



## **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/>)

Encadrement : **Stéphane Clénet (Directeur de thèse) – [stephane.clenet@ensam.eu](mailto:stephane.clenet@ensam.eu)**

**Adrien Van Gorp (Co-encadrant) – [adrien.vangorp@ensam.eu](mailto:adrien.vangorp@ensam.eu)**

Date limite de candidature et modalité : La candidature (CV + lettre de motivation) est à envoyer avant le **15 mars 2020** à **S. Clénet** et **A. Van Gorp**

### **Contexte**

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 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.

### **Enjeux**

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. Il existe aussi des études comparant différents procédés de découpage et leurs effets sur les caractéristiques magnétiques des tôles. 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.

### **Objectif de la thèse**

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.