

Proposition de sujet de thèse

Impacts de la modification des propriétés du Glassfilm des tôles à Grains Orientées sur la découabilité, les outils de punching et les propriétés mécaniques, électriques et magnétiques des circuits magnétiques

Contexte scientifique et économique

La massification des équipements électriques dédiés notamment à la mobilité électrique s'accompagne d'une recherche combinée d'efficacité énergétique et de performances électromagnétiques.

Si on se focalise sur les circuits magnétiques, c'est particulièrement le cas pour les moteurs électriques que les manufacturiers essaient de rendre optimaux en utilisant les aciers électriques qui ont la capacité de véhiculer un maximum de flux magnétique pour obtenir les couples les plus élevés possibles, en minimisant les pertes, notamment les pertes fer. Il s'agit également de réduire les coûts en minimisant les quantités de matériaux, ce qui implique de dessiner des noyaux magnétiques en optimisant la géométrie du circuit magnétique et les rebus de matière.

Actuellement, les circuits magnétiques des moteurs électriques sont majoritairement constitués d'aciers électriques de type Fer Silicium. Les tôles à grains non-orientés (NO) sont généralement utilisées, mais des tôles à grains orientés (GO) offrent de gros avantages : très forte perméabilité magnétique, induction à saturation qui peut atteindre 2,1 T et pertes fer environ 4 fois plus faibles que pour les aciers NO. Ces tôles GO présentent néanmoins deux désavantages :

- Les tôles GO sont très anisotropes si bien que les performances évoquées précédemment ne sont valables que dans la direction de laminage de la tôle.
- Découper les tôles GO par *punching* est plus difficile que pour les aciers classiques car le *glassfilm* qui recouvre la tôle est un composant inorganique particulièrement dur.

Au contexte technologique se superpose une dimension économique avec un vif intérêt des manufacturiers de motorisations électriques et des constructeurs automobiles désireux d'accroître encore davantage les performances des machines tout en réduisant le volume de matière utilisé.

Sensible au problème de découpe des tôles rencontrés par les constructeurs, un des partenaires du consortium, producteur de tôles GO à hautes performances, est en phase exploratoire d'adaptation de son process pour modifier les propriétés du *glassfilm* pour le rendre plus facile à découper par des procédés « grande série ». L'objectif de cette thèse est d'analyser l'impact des modifications du *glassfilm* sur les performances électromagnétiques de la tôle et de paquets de tôles et ce, en prenant en considération l'impact de l'usure de l'outil de découpe mais aussi, de manière réciproque, l'impact de la dureté du revêtement sur l'outil de découpe.

Enfin, le projet eMOBI, dans lequel cette thèse s'inscrit, adjoint une dimension écologique. Ainsi, toutes les entreprises partenaires du projet sont situées dans le Nord et le Pas-de-Calais et les travaux sont menés sous le prisme de l'économie circulaire.

Ce travail doctoral est proposé conjointement par le Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE, UR 4025, Université d'Artois) et le Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielle et Humaine (LAMIH, UMR CNRS 8201, Université Polytechnique Hauts-de-France). Cette collaboration s'explique facilement par la dualité scientifique du projet qui combine électromagnétisme et mécanique.

Objectifs visés

Une analyse de la littérature montre qu'elle regorge d'articles portant sur l'impact de la découpe sur les performances électromagnétiques de tôles NO ou GO. Il est difficile de tirer des conclusions quant à cet impact pour 2 raisons : les aciers analysés diffèrent au fil du temps car les aciéristes ont progressé d'une part et, d'autre part, les caractéristiques des outils de coupe ne sont quasiment jamais mentionnées. Les types de laser sont parfois donnés mais les puissances, vitesses, etc sont occultées, bien souvent par méconnaissance des réglages du découpeur. C'est aussi le cas pour le *punching*.

Le **premier objectif (WP1)** sera donc de caractériser finement les propriétés magnétiques d'une nuance d'acier GO par un dispositif normalisé et en relevant les conditions de découpe. On mettra en œuvre des coupes par cisailage et par estampage en relevant les paramètres de découpe et en analysant les outils de coupe.

Le **deuxième objectif (WP2)** sera d'analyser l'impact de la découpe à un triple niveau.

- Premièrement, on évaluera l'évolution des performances électromagnétiques d'échantillons soumis à des stress de découpe car les déformations plastiques affectent, au bord de tôle, les propriétés électromagnétiques ;
- Deuxièmement, l'analyse portera également sur l'état de surface à l'issue de la découpe : des bavures peuvent être responsables de courants de Foucault générateurs de pertes fer ;
- Troisièmement, on essaiera de quantifier l'impact de l'usure de l'outil sur les 2 phénomènes précédemment évoqués (déformations plastiques et bavures).

Le **troisième objectif (WP3)** portera sur l'évaluation de l'impact du revêtement de la tôle. Il s'agit d'une véritable opportunité technologique. Les protocoles établis précédemment seront appliqués afin d'analyser les caractéristiques électromagnétiques de la tôle et son revêtement au stade échantillonnaire ;

Résultats escomptés

Il s'agira d'analyser l'impact de la découpe sur les pertes fer d'acier GO, l'impact d'un outil d'estampage neuf puis usé sur les performances magnétiques de tôles GO et sur leur état de surface, l'impact du glassfilm sur l'outil d'estampage et l'impact du glassfilm sur les performances de tôles analysées au stade échantillonnaire.

L'analyse reposera sur un plan d'expériences et une base de données renseignée par les essais.

Les paramètres magnétiques porteront sur les inductions, les perméabilités et les pertes fer, locales et globales. Ils seront déterminés sur une large gamme de fréquences, notamment celles des convertisseurs électroniques de puissance de l'automobile, à forts champs et sous différentes températures.

Les paramètres mécaniques seront établis pour le *glassfilm* et pour la tôle GO. Plusieurs approches seront mises en œuvre. Tout d'abord, la dureté et le module d'Young du *glassfilm* pourront être

déterminés par indentation instrumentée ; l'adhérence interfaciale avec la tôle pourra également être observée et explorée. La tribologie évaluera le coefficient de frottement du film avec un matériau (identique ou proche de celui de la lame de découpe du procédé) et l'usure (du film et du frotteur) pourra également être étudiée. La tôle sera caractérisée par indentation instrumentée dans son épaisseur pour identifier l'impact de la découpe sur l'évolution de ses propriétés mécaniques, en particulier à proximité de la zone de coupe. Une analyse morphologique sera proposée afin d'analyser finement les mécanismes d'endommagement du *glassfilm* sous sollicitation tribologique.

Collaborations prévues dans le cadre de la thèse

Ce travail doctoral s'inscrit dans le cadre du projet FTJ E-MOBI. Il fait partie d'un programme scientifique articulé autour de 5 Work Packages visant à analyser l'impact du process de fabrication sur les performances des tôles et des assemblages de pièces segmentées. Les 3 premières tâches font l'objet de cette thèse.

Directeur de thèse : **Jean-Philippe LECOINTE**

Adresse mail : jphilippe.lecointe@univ-artois.fr

Numéro de téléphone : 06 32 43 51 78

Co-directeur de thèse : **Laurent DUBAR**

Adresse mail : Laurent.Dubar@uphf.fr

Numéro de téléphone : 06 71 52 60 25

Ecole Doctorale : **ED STS 585**
École Doctorale Sciences, Technologies, Santé

Laboratoires d'accueil labellisés (*nom et adresse*) :

Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE, UR 4025)
Faculté des Sciences Appliquées, Technoparc Futura, 62 400 BETHUNE

Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH,
UMR CNRS 8201)
Université Polytechnique Hauts-de-France, Campus Mont Houy
59313 VALENCIENNES Cedex 9

Etablissement d'inscription : **Université d'Artois**