

Etude expérimentale de l'effet du compactage hétérogène sur les propriétés d'un circuit magnétique

Hugo HELBLING¹, Abdelkader BENABOU¹, Adrien VAN GORP², Mohamad EL YOUSSEF², Abdelmounaïm TOUNZI¹, Walid BOUGHANMI³ et Daniel LALOY³

¹Université de Lille, L2EP, 59000 Lille, France

²Arts et Métiers ParisTech – MSMP, 59000 Lille, France

³JEUMONT Electric, 59460 Jeumont, France

RESUME – La fabrication des circuits magnétiques de machines électriques implique généralement l'empilement et le pressage des tôles. Si cette étape affecte les propriétés magnétiques de ces circuits, de nouvelles investigations doivent être menées dans le cadre des machines électriques de forte puissance où l'assemblage des circuits magnétiques consiste à empiler plusieurs paquets de tôles séparés par des intercalaires qui maintiennent les écartements des événements. La concentration des contraintes dans les régions où sont placés les intercalaires nécessite donc une attention particulière. Ces travaux présentent les caractérisations expérimentales d'un circuit magnétique torique (loi de comportement B-H, pertes fer) mis sous pression avec et sans intercalaires. La maquette développée permet d'effectuer ces caractérisations sous différents niveaux et différentes répartitions de pressions représentatives des procédés industriels.

Mots-clés—propriétés magnétiques, pertes fer, procédés de fabrication, contrainte mécanique

1. INTRODUCTION

Dans le contexte de l'accroissement de l'efficacité énergétique des machines électriques de fortes puissances, la réduction des pertes constitue un point clé. Toutefois, il existe encore des écarts significatifs entre les pertes fer estimées à partir des modèles existants et celles mesurées en pratique. Ces écarts sont notamment liés à l'impact des procédés de fabrication des circuits magnétiques de machines électriques sur leurs propriétés et sur leurs performances. Les procédés les plus étudiés dans la littérature sont la découpe, le soudage, le pressage ou encore le fretage [1]-[5]. Ces études montrent que ces procédés dégradent les propriétés magnétiques que ce soit de manière localisée sur le bord de coupe pour les procédés de découpe ou par l'apparition de contraintes mécaniques sur des régions plus importantes du circuit magnétique pour le fretage ou le soudage.

Les présents travaux portent sur le procédé de pressage des circuits magnétiques (i.e. stator ou rotor) dans le sens perpendiculaire au plan des tôles, notamment dans le cas des grands alternateurs. En effet, les circuits magnétiques qui les composent sont constitués de plusieurs paquets de tôles empilés les uns sur les autres et séparés par des intercalaires qui définissent les écartements des événements et qui permettent le refroidissement de la machine par convection. L'ensemble des paquets de tôles est alors pressé dans le sens de la hauteur du circuit magnétique. Celui-ci est ensuite placé dans une cage et l'effort de pressage est maintenu par l'intermédiaire de deux

anneaux reliés par des barreaux soudés et/ou des vis de serrage. Les effets du procédé de pressage sur les propriétés magnétiques ont été étudiés dans quelques articles sans prendre en compte la répartition de cet effort ou en considérant que celui-ci est homogène [6], [7]. D'autres travaux, comme [8], modélisent, par éléments finis, la répartition de la contrainte au sein d'un circuit toroïdal afin d'aboutir à la distribution la plus homogène possible. D'une manière générale, tous ces travaux montrent un effet sur les propriétés magnétiques. Toutefois, dans le cas des machines électriques de fortes puissances, les contraintes de compression induites par le pressage peuvent avoir une distribution hétérogène, à cause de la présence des intercalaires, qui va engendrer des contraintes mécaniques localisées et potentiellement très importantes. Il n'existe pas de travaux traitant de cette problématique, à ce jour, si ce n'est une première étude que nous avons réalisée [9].

L'objectif de cette communication est d'investiguer l'effet d'une distribution hétérogène de la contrainte de compression, dans le sens de l'épaisseur de la tôle, sur les propriétés magnétiques d'un circuit torique composé de tôles M400-65A qui est un grade de tôle régulièrement utilisé pour les machines de fortes puissances. Pour cela, une maquette expérimentale a été développée à l'aide de simulations mécaniques par éléments finis afin de connaître, de manière précise, la répartition de l'effort au sein du circuit magnétique. Cette maquette permet de faire des caractérisations magnétiques (loi de comportement B-H, pertes fer) sous pression mécanique, perpendiculairement au plan des tôles. En pression homogène, le dispositif expérimental permet d'atteindre jusqu'à 4 MPa. De plus, deux dispositions d'intercalaires ont été conçues, permettant de faire ces mesures pour différentes répartitions hétérogènes de l'effort, avec des contraintes locales pouvant atteindre jusqu'à 80 MPa. Les effets d'une répartition hétérogène de la contrainte de compression, dans cette configuration, sur les propriétés magnétiques d'un paquet de tôles représente un cas industriel pratique lié à la présence d'événements dans les grands alternateurs.

Le plan de l'article est le suivant : premièrement, on présentera le développement et la validation de la maquette, incluant le développement d'échantillons de références, une analyse de répétabilité et une méthode de compensation du flux dans l'air. Puis, on présentera le protocole expérimental qui a été suivi. Enfin, les résultats et les discussions issus des essais avec répartitions de contraintes homogènes et hétérogènes seront donnés avant de présenter les principales conclusions, les limites et les perspectives de ces travaux.

2. DEVELOPPEMENT DE LA MAQUETTE

2.1. Géométrie de la maquette

La maquette (Fig. 1) est composée d'un circuit magnétique (f), d'un bobinage primaire et d'un bobinage secondaire placés sur deux supports encochés (d) ainsi que d'un système de mise sous pression (a, b, c). Les deux supports de bobinages sont placés de part et d'autre du circuit magnétique. L'effort est appliqué à l'aide d'une vis de serrage (a) et est mesuré par un capteur d'effort (b). Les plaques de PVC (c) permettent d'assurer une bonne transmission de l'effort. Les mesures avec répartition hétérogène de l'effort se font avec la présence des intercalaires (e) et le cas homogène se fait en ôtant ces derniers. La hauteur du circuit magnétique a été choisie proche de celle utilisée industriellement pour certaines machines de forte puissance (environ 42 mm par paquet de tôles). Une vue de coupe de la maquette, avec les dimensions est donnée en Fig. 2.

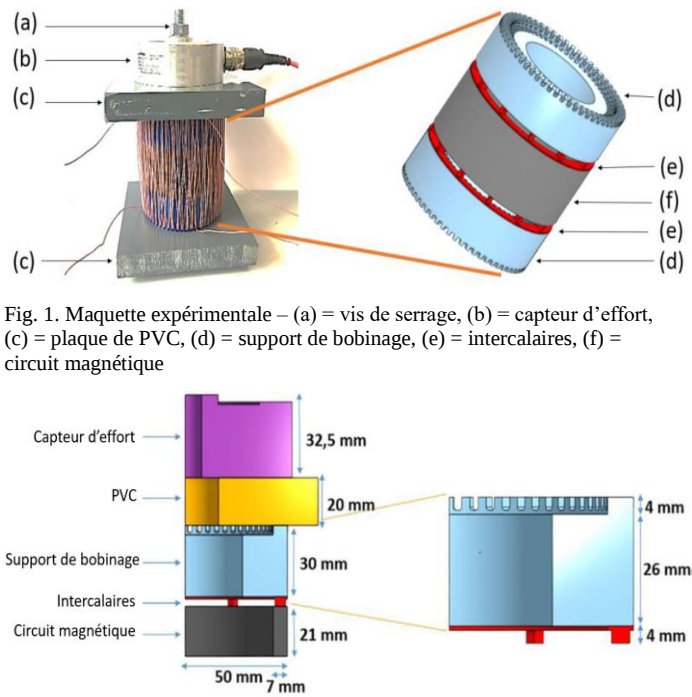


Fig. 2. Vue de coupe de la moitié de la maquette suivant sa hauteur et dimensions associées

2.2. Dimensionnement de la maquette

Le dimensionnement de la maquette a été réalisé en se basant sur deux principaux critères.

Le premier est d'assurer l'homogénéité de la répartition de la contrainte, dans le sens de la hauteur, dans le cas où on ne considère pas les intercalaires. Le second critère vise quant à lui à assurer la bonne tenue mécanique de l'ensemble des pièces sur la gamme de pression étudiée qui va de 0 à 4 MPa dans le cas homogène et de 0 à 80 MPa dans le cas hétérogène. Pour le premier point, des simulations mécaniques par éléments finis ont été réalisées sur le logiciel *SimScale* [10] afin de valider l'homogénéité de la contrainte au sein du circuit magnétique. Pour cela, nous avons considéré un important coefficient de frottement de Coulomb, de 0,5, pour modéliser les contacts (entre le capteur et le PVC, entre le PVC et le support de bobinage, entre le support de bobinage et les intercalaires, entre le support de bobinage et le circuit magnétique et entre les intercalaires et le circuit magnétique). Cette valeur est dans la fourchette haute des valeurs communément rencontrées dans la réalité, où ces coefficients de frottement seraient plutôt situés entre 0,1 et 0,5). Toutefois elle permet de se retrouver dans le cas le plus défavorable en ce qui concerne l'homogénéité de

l'effort. Les résultats sont donnés sur la Fig.3. On ne considère qu'un quart de la maquette suite à la symétrie de révolution. Par ailleurs, seule une moitié de la maquette dans le sens de la hauteur est modélisée en imposant, sur la surface du milieu du circuit magnétique sur la Fig. 3, une condition de non déplacement.

Pour le second critère, les matériaux utilisés pour le capteur d'effort et le circuit magnétique sont respectivement de l'aluminium anodisé, matériau choisi par le fabricant du capteur d'effort, et des tôles M400-65A. Concernant les supports de bobinage, le matériau utilisé est non magnétique et non conducteur électrique. Sa résistance à la compression est de l'ordre de 110 MPa. Les paramètres mécaniques de chaque matériau (module de Young et coefficient de Poisson) sont donnés dans le Tableau 1.

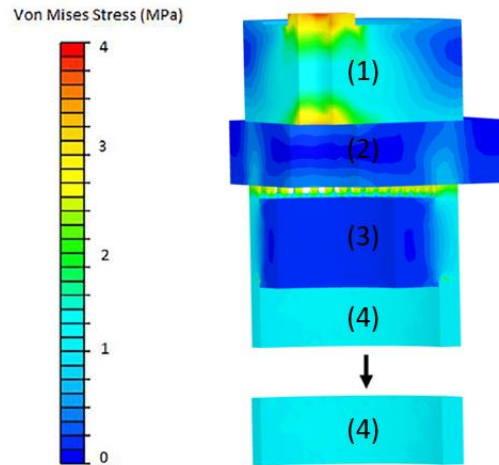


Fig. 3. Contrainte de Von Mises dans la section de la maquette (haut) et dans le circuit magnétique bas. (1) :Capteur de force, (2) :Plaque de PVC, (3) :Support de bobinage, (4) :Circuit magnétique

Matériau (Fig. 3)	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson
Capteur d'effort (1)	70	0,34
PVC (2)	3	0,4
Support de bobinage (3)	3,5	0,36
Circuit magnétique (4)	211	0,29

Tableau 1. Paramètres mécaniques des matériaux

Les tôles M400-65A ont été découpées par électroérosion [11] afin de réduire l'effet de la découpe sur leurs propriétés magnétiques. Leur diamètre extérieur est de 100 mm et leur diamètre intérieur est de 86 mm. Enfin, la géométrie encochée des supports de bobinage impose de bobiner à la main, avec 120 tours au primaire et 60 tours au secondaire.

2.3. Validation de la maquette

Afin de valider la maquette développée, il est nécessaire d'avoir des mesures de référence. Pour cela, nous avons fabriqués deux circuits magnétiques de référence, Fig.4. Toutes les mesures magnétiques que nous avons réalisées ont été effectuées à l'aide de l'équipement MPG200D de la société Brockhaus Measurements^{GmbH} selon le standard IEC 60404-4 [12]. La répétabilité des mesures avec cet équipement est inférieure à 0,1%. Toutefois, la précision du capteur d'effort et l'erreur introduite par le comportement viscoélastique des supports de bobinage impactent la répétabilité des mesures qui reste néanmoins inférieure à 0,5% pour les niveaux de contraintes considérés. Comme nous le verrons par la suite, les effets de la contrainte, dans le sens de la hauteur, sur les propriétés magnétiques sont bien plus significatifs que ce niveau d'erreur de répétabilité.



Fig. 4. Circuits magnétiques de référence

Les pertes fer et les lois normales $B_{\max}$ - $H_{\max}$ sont les mêmes pour les deux circuits magnétiques, comme on peut le voir sur la Fig.5. De plus, les pertes fer mesurées pour une induction magnétique sinusoïdale maximale de 1,5T à 50Hz sont de 3,75W/kg, respectant de ce fait le grade des tôles M400-65A avec lesquelles nous travaillons. La méthode de découpe utilisée ne semble pas avoir impacté les propriétés magnétiques de manière significative même dans le cas du circuit magnétique de test avec une largeur limitée (7mm) [18].

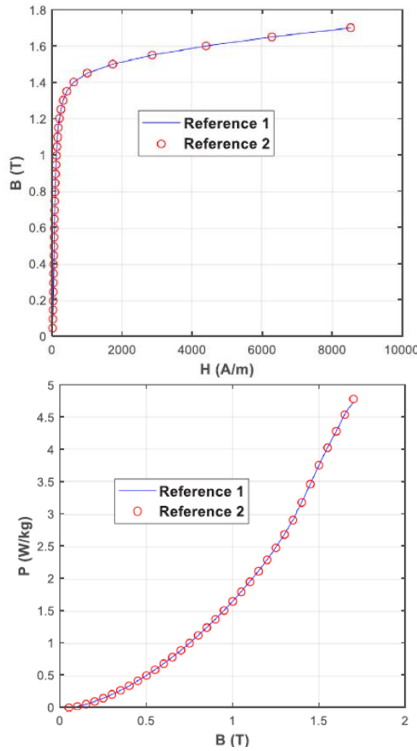


Fig. 5. Comparaison des courbes $B_{\max}$ - $H_{\max}$ (haut) et des pertes fer (bas) à 50 Hz pour les deux circuits de référence

L'étape suivante est de comparer les propriétés magnétiques des circuits de référence avec celles du circuit utilisé pour la maquette d'essai sous pressage. Premièrement, les tôles utilisées pour les circuits de référence et pour la maquette ont les mêmes diamètres intérieur et extérieur, ont été découpées en même temps, par la même technique (électroérosion) et sont issues de la même bobine de tôle. La hauteur n'est cependant pas la même puisqu'elle est de 15 mm pour les circuits de référence (contre 42 mm pour la maquette), toutefois, la section du circuit reste largement au-dessus des standards recommandés. De même, le bobinage n'est pas le même : pour la maquette, il est nécessaire de compenser le flux dans l'air à cause de la présence des supports de bobinage. En effet, le flux mesuré expérimentalement est la somme du flux dans le circuit

magnétique et dans les supports de bobinage, donc dans l'air puisque ces derniers sont non magnétiques. Toutefois, ce qui nous intéresse est le flux dans le circuit magnétique. Si la meilleure option serait d'introduire une bobine de compensation, la complexité géométrique de la maquette et la difficulté de bobinage ne permettent pas sa mise en œuvre. C'est pourquoi nous avons décidé d'introduire un facteur de compensation mathématique pour compenser analytiquement le flux dans l'air. Ce facteur n'intervient que dans la mesure de la courbe normale $B_{\max}$ - $H_{\max}$ puisque les pertes fer sont une grandeur massique. On observe alors un écart inférieur à 0,2% sur les pertes fer entre les circuits de référence et le circuit de la maquette. Concernant les lois magnétiques normales, les résultats sont donnés sur la Fig.6. Ceux-ci montrent que le facteur correctif donne des résultats très satisfaisants, lorsqu'on compare les résultats obtenus à des résultats de référence. De plus, on voit également que l'effet du pressage sur les propriétés magnétiques est prépondérant devant l'écart introduit par le flux dans l'air. De ce fait, on peut considérer que la maquette est validée, que ce soit au niveau des mesures magnétiques ou de la répartition de l'effort au sein du circuit magnétique.

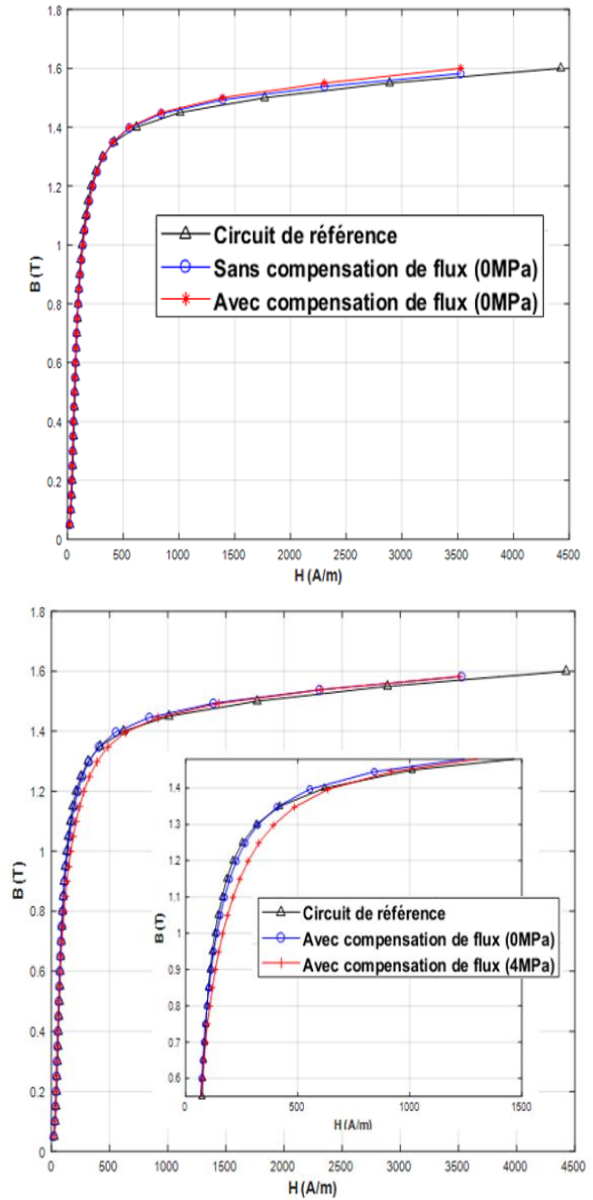


Fig. 6. Courbes $B_{\max}$ - $H_{\max}$ avec compensation de flux à 0 MPa (haut) et comparaison de ces courbes à 0 MPa et 4 MPa pour une pression homogène (bas)

3. MESURES, RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Mesures

Cette partie a pour objectif de présenter le protocole suivi pour les mesures et les points importants. Comme énoncé précédemment, les supports de bobinages sont non magnétiques et peuvent supporter les contraintes mécaniques qui vont être appliquées. Toutefois, pour ces niveaux de contraintes, le matériau utilisé a un comportement viscoélastique [13] qu'il est nécessaire de prendre en compte. En effet, lorsque la maquette est mise en compression, le niveau de contrainte va diminuer progressivement à cause de la viscoélasticité du matériau, il est donc nécessaire d'ajuster le serrage de la vis à plusieurs reprises afin d'atteindre un niveau stable. De même, pour des niveaux d'inductions supérieurs à 1,4T, les supports de bobinages vont subir un échauffement à cause des pertes Joule dans le bobinage et vont engendrer une dilatation thermique au niveau des supports de bobinage ce qui va induire une augmentation de la contrainte au sein du circuit magnétique. Afin de résoudre ce problème, un dispositif de refroidissement est mis en place à l'aide de ventilateurs.

Dans le cas d'une pression homogène, les mesures sont réalisées pour des niveaux de contraintes, dans le circuit magnétique, allant jusqu'à 4 MPa. Pour une répartition de pression hétérogène, deux dispositions d'intercalaires sont étudiées. Pour chacune de ces dispositions, les mêmes forces que pour le cas homogène sont appliquées, ce qui veut dire que la pression globale sur le circuit magnétique est la même mais avec des contraintes locales beaucoup plus importantes, allant jusqu'à 80 MPa. Ce niveau de contrainte locale est obtenu analytiquement, en faisant le rapport de la force appliquée sur la surface de contact entre les intercalaires et le circuit magnétique, mais aussi par les calculs par éléments finis. Les deux dispositions d'intercalaires étudiées sont présentées sur la Fig.7. Les dispositions (A) et (B) possèdent respectivement 12 et 6 intercalaires. Les niveaux locaux maximums de 80 MPa correspondent au cas (B) tandis que pour le cas (A) ils sont de 40 MPa.

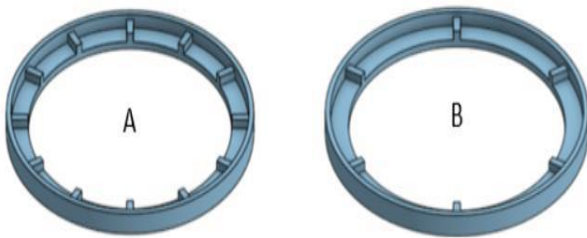


Fig. 7. Différentes dispositions d'intercalaires étudiées

Les mesures sont réalisées pour des niveaux d'inductions allant de 0,05 T à 1,6 T pour des fréquences de 5Hz, 25Hz, 50Hz, 100Hz, 150Hz, 200Hz et 250Hz. Ces mesures sont faites pour des niveaux de contraintes globaux de 0MPa, 1MPa, 2MPa, 3MPa et 4MPa.

3.2. Resultats et discussions

Premièrement, on présente l'influence de la pression sur le champ magnétique sur la Fig.8, à 50Hz. L'effet du pressage sur le champ magnétique, pour d'autres niveaux de fréquences, est globalement le même qu'à 50Hz.

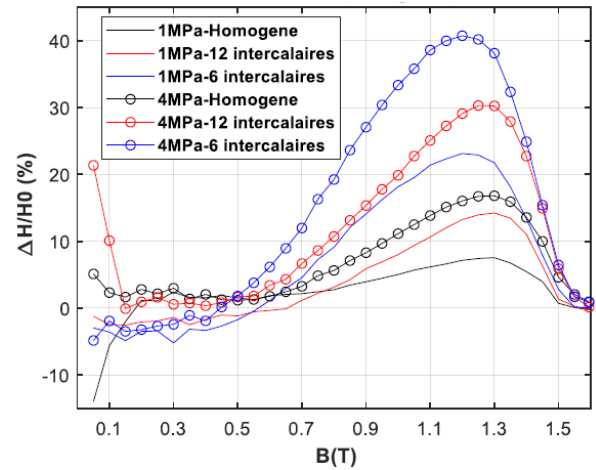
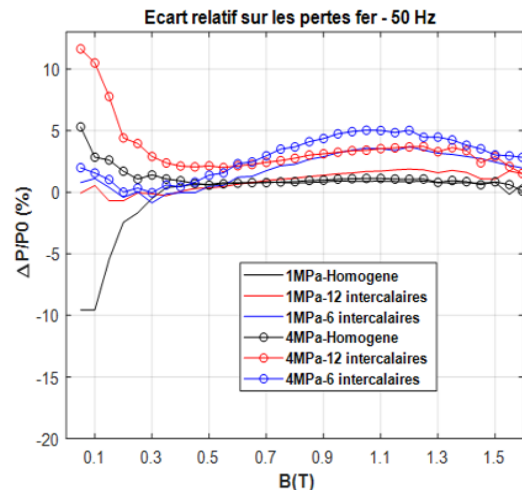


Fig. 8. Influence de la distribution de la pression sur le champ magnétique

On remarque tout d'abord que le cas hétérogène est bien plus impactant que le cas homogène et que, pour un même effort global de pressage, la loi de comportement magnétique est plus dégradée lorsqu'il y a moins d'intercalaires. Ceci peut s'expliquer par des contraintes locales bien plus importantes. De plus, la dégradation se situant majoritairement dans le coude de saturation, la présence d'intercalaires implique de devoir fournir des champs magnétiques beaucoup plus importants qu'en leur absence pour atteindre des inductions supérieures à 0,6T. Concernant les effets sur les pertes fer, les résultats sont donnés pour les fréquences de 5Hz, 50Hz et 250Hz, sur les Fig.9 et Fig.10.

Considérons tout d'abord les fortes inductions (> 0,5T). On peut constater que la mise sous pression augmente les pertes et que cette tendance est accentuée par l'augmentation de la fréquence. Pour des répartitions de pression homogène, ces augmentations sont très faibles, voire inexistantes, alors qu'elles sont beaucoup plus importantes avec la présence d'intercalaires. Enfin, comme pour les effets observés sur le champ magnétique, c'est le cas avec le moins d'intercalaires qui induit les plus importantes dégradations.

Pour les niveaux d'inductions plus faibles (<0,5T), les écarts observés varient puisqu'on peut à la fois observer des réductions et des augmentations de pertes, selon le cas. De manière générale, ces résultats montrent que la présence d'intercalaires dégrade les propriétés magnétiques du circuit magnétique composé des tôles M400-65A, notamment à cause de contraintes locales significatives.



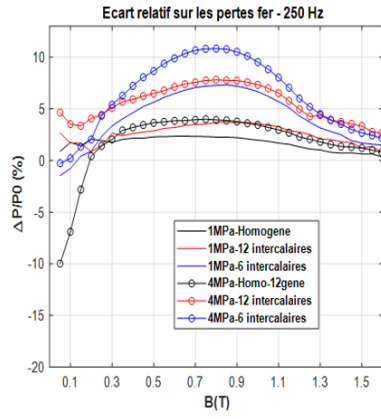


Fig. 9. Influence de la distribution de la pression sur les pertes fer à 50Hz (haut) et à 250Hz (bas)

Afin d'approfondir l'étude, on a tracé, sur la Fig.10, l'évolution des pertes par hystérésis que nous avons obtenue par extrapolation à la fréquence 0 Hz des pertes fer mesurées. Nous considérons les pertes classiques comme étant constantes, puisqu'aux niveaux de pressions étudiés, la conductivité électrique des tôles n'est pas modifiée. De même, il n'y a aucune déformation mécanique du circuit magnétique, puisque les contraintes mécaniques exercées sur le circuit sont très faibles, vis-à-vis du module de Young de l'acier (~211 GPa). Pourtant, si on remarque bien que les pertes par hystérésis sont impactées de manière notable et que celles-ci, par définition, sont indépendantes de la fréquence, on remarque également que la dégradation observée sur les pertes fer totales augmente avec la fréquence ce qui semble indiquer une augmentation de la troisième contribution aux pertes totales, à savoir les pertes excédentaires, avec la mise sous pression, notamment pour des inductions moyennes.

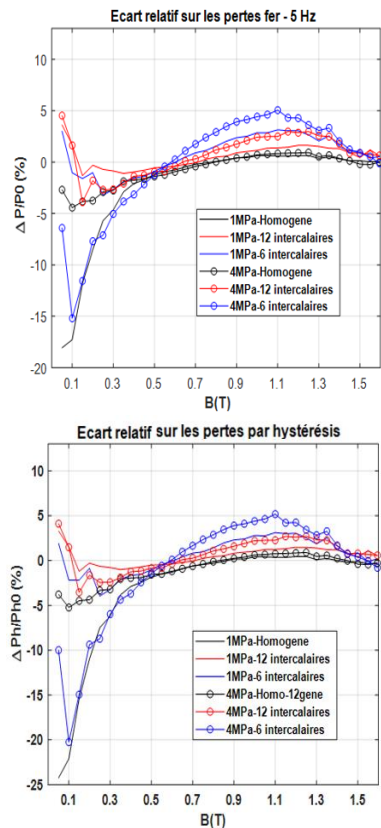


Fig. 10. Influence de la distribution de la pression sur les pertes fer à 5Hz (haut) et sur les pertes par hystérésis (bas)

Afin d'expliquer ces phénomènes, une hypothèse basée sur les résultats expérimentaux, sur des considérations physiques et également sur des simulations mécaniques par éléments finis est avancée. Celle-ci consiste à considérer qu'en présence des intercalaires, la contrainte de compression dans le sens de la hauteur induit une contrainte dans le plan des premières tôles. Des simulations plus complètes ont été réalisées avec le logiciel Abaqus [14] pour une analyse plus fine du comportement mécanique. Les Fig.11, 12 et 13 montrent, pour le cas avec 6 intercalaires et une pression globale de 4 MPa, la répartition de la contrainte mécanique selon $\vec{e}_z$, $\vec{e}_\theta$ et $\vec{e}_r$. Ces trois directions correspondent respectivement au sens de la hauteur du paquet de tôles, au sens du flux dans le circuit magnétique et au sens orthogonal à la circulation du flux.

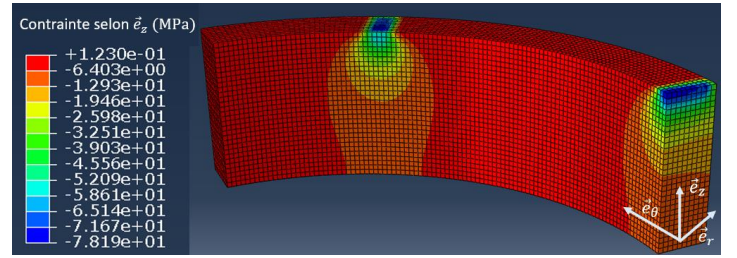


Fig. 11. Répartition de la contrainte selon $\vec{e}_z$ dans le circuit magnétique

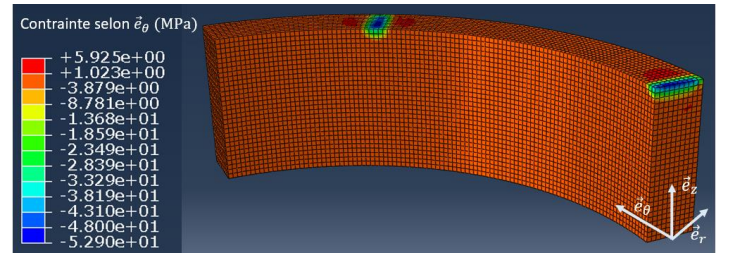


Fig. 12. Répartition de la contrainte selon $\vec{e}_\theta$ dans le circuit magnétique

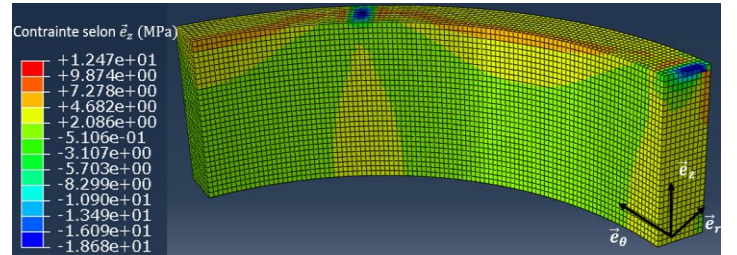


Fig. 13. Répartition de la contrainte selon $\vec{e}_r$ dans le circuit magnétique

Comme attendu, on remarque sur la Fig. 10, des contraintes locales maximales de l'ordre de 80 MPa et des cônes de contraintes sous les intercalaires. Toutefois, contrairement au cas d'une pression homogène où la contrainte est quasi exclusivement selon le sens de la hauteur, la présence des intercalaires induit des contraintes dans le plan, soit dans le sens du flux, Fig.11, avec des contraintes localisées sous les intercalaires qui sont en compression et qui atteignent jusqu'à ~50 MPa. Pour ce qui est de la contrainte orthogonale au sens du flux, Fig.13, on remarque sous les intercalaires une contrainte de compression allant jusqu'à ~18 MPa. Toutefois, de manière globale, l'ensemble du circuit magnétique est sous contrainte de traction puisque les zones vertes correspondent à des contraintes de traction comprises entre 0 et 2 MPa tandis que les zones jaunes correspondent à des niveaux de contraintes comprises entre 2 et 4 MPa et les zones oranges entre 4 et 6 MPa.

Ainsi, les dégradations observées sur les propriétés magnétiques dans le cas d'une pression homogène ne semblent

être liées qu'à la pression dans le sens de la hauteur, puisqu'il n'y a pas de contraintes induites dans le plan. Ces modifications peuvent être mises en lien avec les effets de magnétostriction observés dans [15], ce qui pourrait expliquer les améliorations des pertes par hystérésis pour des faibles niveaux d'inductions, Fig.10. Toutefois, de nouvelles études doivent être menées afin de mieux comprendre le phénomène de magnétostriction dans le sens de la hauteur.

De plus, les différences observées entre le cas d'une répartition homogène et d'une répartition hétérogène de l'effort de pressage semblent bien liées à l'apparition de contraintes dans le plan. En effet, il est clairement établi dans la littérature que la contrainte mécanique dans le plan a une forte influence sur les propriétés magnétiques [16-18]. Jusqu'à une contrainte limite, la contrainte de traction améliore les propriétés magnétiques dans le sens du flux puis, passée cette valeur, les propriétés magnétiques vont être dégradées. Pour ce qui est de la contrainte de compression, elle dégrade constamment et graduellement les propriétés magnétiques et pour les mêmes niveaux de contraintes elle est beaucoup plus dégradante que la traction. Les effets sont inversés dans le sens orthogonal au sens du flux [18].

Ainsi, les répartitions de contraintes observées sur les Fig. 11, 12 et 13, la contrainte selon $\vec{e}_r$ semble être la plus dégradante. De même, le cas avec 12 intercalaires engendre des contraintes dans le plan moins importantes, mais tout de même présentes, ce qui explique le fait que les dégradations observées soient plus faibles que pour le cas à 6 intercalaires et plus importantes que pour le cas homogène. Toutefois, des études supplémentaires doivent être menées.

4. CONCLUSIONS

La présente étude a traité de l'effet de la mise sous pression sur les propriétés d'un circuit magnétique torique. Une maquette expérimentale a été développée afin d'étudier trois configurations différentes : une répartition homogène de l'effort de pressage au sein du circuit magnétique et deux répartitions hétérogènes. Ces dernières sont réalisées grâce à deux dispositions différentes d'intercalaires. Une distribution hétérogène dégrade la loi de comportement ainsi que les pertes fer de manière plus prononcée qu'une distribution homogène. Aussi, plus les contraintes locales sont importantes, plus la dégradation observée est forte. Ces dégradations se trouvent majoritairement dans le coude de saturation pour la loi de comportement tandis qu'on remarque une augmentation des pertes fer plus marquée au-dessus de 1,5T. Des simulations mécaniques ont été effectuées et montrent que si le cas hétérogène, en présence d'intercalaires, est plus dégradant d'un point de vue magnétique, ceci est lié à l'apparition de contraintes mécaniques dans le plan des tôles qui vont dégrader les propriétés magnétiques. Ces travaux ouvrent la voie vers une conception de grands alternateurs en prenant en compte l'impact du pressage du circuit magnétique. D'autres études doivent toutefois être menées: si nos résultats semblent indiquer que la contrainte dans le plan est plus dégradante que la contrainte dans le sens de la hauteur, il est nécessaire de développer une maquette permettant de montrer, dans le cas d'une répartition homogène de l'effort, à des niveaux de contraintes plus importants pour voir l'évolution de la dégradation sur les propriétés magnétiques sur une gamme de pression plus importante. De plus, il est également nécessaire de quantifier expérimentalement, sur les tôles M400-65A étudiées, l'effet de la contrainte dans le plan. Par ailleurs, il est pertinent de faire varier la forme et l'orientation des intercalaires puisqu'en pratique, celles-ci se trouvent à la fois sur les dents du stator ou du rotor mais aussi dans la culasse statorique. De même, si la

pression a bien une distribution hétérogène sur les premières tôles, celle-ci finit par être quasiment homogène au milieu du paquet de tôles. De ce fait, la hauteur du paquet va, en partie, absorber l'effet de la distribution de l'effort. Il est donc nécessaire de mettre en place des essais similaires sur une seule tôle ou sur un paquet de tôles beaucoup moins épais afin, d'une part, d'avoir l'effet de la distribution de l'effort sur les propriétés magnétiques de la tôle et, d'autre part, de permettre ensuite de développer des modèles prenant en compte l'effet pressage dans la conception de machines électriques.

5. REFERENCES

- [1] M. Bali, A. Muetze, Modeling the effect of cutting on the magnetic properties of electrical steel sheets, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 64 (3) (2017) 2547–2556.
- [2] K. Bourchas et al., Influence of cutting and welding on magnetic properties of electrical steels, in: 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016, pp. 1815–1821.
- [3] A. Schoppa, J. Schneider, C.-D. Wuppermann, T. Bakon, Influence of welding and sticking of laminations on the magnetic properties of non-oriented electrical steels, *J. Magn. Magn. Mater.* 254–255 (2003) 367–369.
- [4] K. Yamazaki et, W. Fukushima, Loss analysis of induction motors by considering shrink fitting of stator housings, *IEEE Trans. Magn.* 51 (3) (2015) 1–4.
- [5] D. Miyagi, Y. Aoki, M. Nakano, N. Takahashi, Effect of compressive stress in thickness direction on iron losses of nonoriented electrical steel sheet, *IEEE Trans. Magn.* 46 (6) (2010) 2040–2043.
- [6] K. Yamamoto, S. Yanase, Magnetic properties of non-oriented electrical steels under compressive stress normal to their surface, *Przeglad Elektrotechniczny* (2011).
- [7] Y. Maeda, et al., Development of the apparatus for measuring magnetic properties of electrical steel sheets in arbitrary directions under compressive stress normal to their surface, *AIP Adv.* 7 (5) (2017) pp. 056664.
- [8] N. Alatawneh, T. Rahman, D.A. Lowther, R. Chromik, Design and analysis of a toroidal tester for the measurement of core losses under axial compressive stress, *J. Magn. Magn. Mater.* 432 (2017) 519–526.
- [9] H. Helbling, A. Benabou, A. Van Gorp, M. El Youssef, A. Tounzi, W. Boughanmi and D. Laloy, Effect on magnetic properties of inhomogeneous compressive stress in thickness direction of an electrical steel stack, *J. Magn. Magn. Mater.* 500 (2020) 166353
- [10] SimScale Software, SimScale GmbH, 2019.
- [11] V. Manescu Paltanea, G. Paltanea, H. Gavrilă, Energy loss analysis and magnetic properties of non-oriented electrical steel cut through different technologies, *Adv. Mater. Res.* (2015).
- [12] 60404-2 IEC, Methods of Measurements of d.c. Magnetic Properties of Iron Steel, IEC Stand. Publ., 1995.
- [13] J.D. Ferry, *Viscoelastic Properties of Polymers*, John Wiley & Sons, 1980.
- [14] ABAQUS, ABAQUS Documentation, Dassault Systemes, Providence, RI, USA, 2011.
- [15] G.H. Shirkoobi, A.J. Moses, Effects of stress on magnetostrictive properties of low silicon non-oriented electrical steel, *J. Magn. Magn. Mater.* 83 (1) (1990) 177–178.
- [16] A.P.S. Baghel, et al., An alternative approach to model mechanical stress effects on magnetic hysteresis in electrical steels using complex permeability, *Comput. Mater. Sci.* 166 (2019) 96–104.
- [17] D. Miyagi, K. Miki, M. Nakano, N. Takahashi, Influence of compressive stress on magnetic properties of laminated electrical steel sheets, *IEEE Trans. Magn.* 46 (2) (2010) 318–321.
- [18] U. Aydin, P. Rasilo, F. Martin, A. Belahcen, L. Daniel, A. Haavisto and A. Arkkio, Effect of multi-axial stress on iron losses of electrical steel sheets, *J. Magn. Magn. Mater.* 469 (2019) 19–27.