

Effet de la température de fonctionnement sur le comportement électromagnétique d'un noyau magnétique massif

Meryeme Toto Jamil^{1,2}, Abdelkader Benabou¹, Stéphane Clénet¹, Laure Le Bellu Arbenz² et Jean-Claude Mipo²

¹ Univ. Lille, Arts et Metiers ParisTech, Centrale Lille, HEI, EA 2697 - L2EP -Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance, F-59000 Lille, France

² Valeo Powertrain Systems, 2 Rue André Charles Boulle, 94046 Créteil Cedex, France

RESUME - En fonctionnement, la température au sein d'une machine électrique peut être élevée. En particulier, au rotor d'une machine à griffes elle peut atteindre localement 180 °C. En conséquence, les propriétés électromagnétiques du rotor sont modifiées, affectant ainsi les performances de la machine. Cette modification peut être réversible c'est-à-dire que le matériau retrouve son état initial avec la diminution de la température, comme elle peut être irréversible et on parle alors de vieillissement magnétique du matériau. Dans ce travail, on étudie les évolutions réversible et irréversible en fonction de la température des caractéristiques électromagnétiques d'un alliage ferromagnétique utilisé pour réaliser les pièces polaires d'un rotor de machine à griffes. Ce matériau possède une composition chimique ainsi qu'un procédé d'élaboration différent de celui des aciers électriques habituels (tôles).

Mots-clés—Effet de la température, Vieillessement magnétique, Caractérisation magnéto-thermique, Conductivité électrique, Propriétés magnétiques.

1. INTRODUCTION

Dans les machines électriques, les matériaux ferromagnétiques sont au cœur de la conversion d'énergie. Leur température en fonctionnement influence leur comportement et potentiellement leur vieillissement, affectant ainsi les performances de la machine. En effet, lors de la conversion électromécanique, les différentes sources de pertes (pertes fer, pertes Joule) conduisent à un échauffement plus ou moins important de la machine. Dans certaines applications, la température peut être localement relativement élevée, comme dans le cas de la Roue Polaire (RP) des machines à griffes, où les points chauds peuvent atteindre 180°C. Cette variation de température conduit d'une part à une modification des propriétés électromagnétiques (conductivité électrique, perméabilité magnétique, pertes fer, magnétisation à saturation ...) qui ne sont plus les mêmes qu'à température ambiante [1]. Les phénomènes sont en partie réversibles au sens où, une fois refroidi, le matériau retrouve ses propriétés initiales. Mais, combinée au facteur temps, cette augmentation de la température peut, d'autre part, activer des mécanismes de diffusion atomique et de précipitation modifiant la microstructure de l'acier. Ainsi, les propriétés

électromagnétiques du matériau changent de façon irréversible. Il s'agit du vieillissement magnétique [2]. Les effets de la température sur les propriétés électromagnétiques du matériau ont été étudiés dans le cas des tôles qui sont très majoritairement exploitées dans les machines électriques. Dans le cas des matériaux utilisés pour la fabrication de pièces massives, tel celui de la RP d'une machine à griffes, aucune étude n'existe à ce sujet.

En pratique, pour la caractérisation magnétique, et contrairement aux tôles magnétiques, la RP nécessite une approche différente. Il s'agit en effet d'un noyau massif forgé de géométrie complexe pour permettre une circulation tridimensionnelle du flux magnétique. A la fin du processus de fabrication, la pièce finale se révèle hétérogène en termes de microstructure et de propriétés mécaniques, et par conséquent en termes de propriétés magnétiques aussi [3]. Par ailleurs, la composition chimique et la température de fonctionnement des matériaux utilisés dans la RP, la rendent sensible au vieillissement magnétique [2].

Dans cette communication, on s'intéresse aux effets réversibles et irréversibles de la température de fonctionnement sur les propriétés électromagnétiques du matériau constituant une RP de machine à griffes. Le travail présenté s'articule en trois parties. La première propose une méthodologie spécifique permettant de caractériser les propriétés électromagnétiques de la RP à différentes températures. La deuxième étudie les propriétés magnétiques en fonction de la température. Enfin, la troisième partie porte sur le vieillissement magnétique du matériau de la RP.

2. METHODOLOGIE DE CARACTERISATION

2.1. Echantillons

En raison de l'hétérogénéité des propriétés magnétiques dans la RP [4], il est nécessaire de prélever des échantillons qui soient représentatifs des différentes zones de la RP. Il faut par ailleurs que ces échantillons soient obtenus par le moyen de prélèvement le moins impactant possible sur leurs propriétés électromagnétiques. Compte tenu de la géométrie et des dimensions de la RP, des échantillons parallélépipédiques (35 mm x 10 mm x 1 mm) ont été prélevés par électroérosion à fil.

Cette technique est en effet reconnue pour son impact limité sur les propriétés magnétiques des pièces découpées [5].

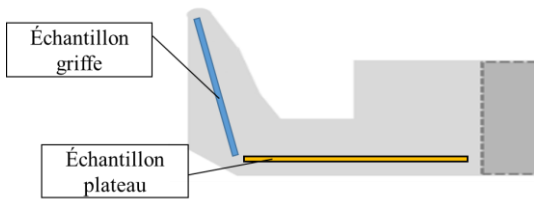


Figure 1 : Emplacement des prélèvements dans la roue polaire

2.2. Dispositif de caractérisation

2.2.1. Caractérisation magnétique

La Figure 2 présente le dispositif de caractérisation magnétique. Il s'agit d'un Single Sheet Testet (SST) miniaturisé pouvant opérer à température élevée (jusqu'à 200 °C). Le choix d'utilisation d'un mini SST est lié à la forme complexe de la RP dans laquelle il n'est possible d'extraire que des échantillons de dimensions réduites et non adaptés pour une utilisation de matériel standard de caractérisation comme un cadre d'Epstein (norme CEI 60404-2) ou un SST (norme CEI 60404-3) [3]. L'excitation magnétique est créée à partir du courant alternatif qui circule dans la bobine primaire enlaçant la culasse. Grâce à deux sondes à effet Hall, de haute précision avec une très faible erreur de linéarité (typiquement 0,1% jusqu'à 1,5 T), le champ d'excitation est mesuré en deux points au-dessous de l'échantillon. Ces deux valeurs permettent par extrapolation linéaire d'estimer le champ d'excitation H à la surface du matériau. Les sondes à effet Hall incluent une compensation en température jusqu'à 200 °C. L'induction magnétique B est quant à elle déterminée à l'aide d'une bobine secondaire placée autour de l'échantillon.

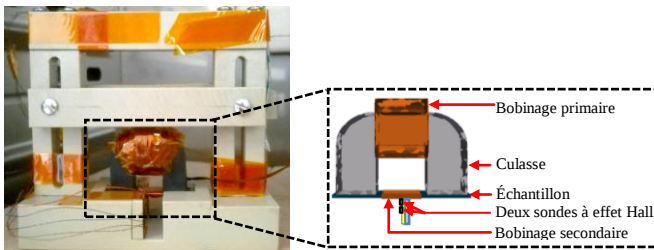


Figure 2. Schéma et photo du dispositif de caractérisation magnétique

Pour valider le dispositif expérimental de caractérisation magnétique, une première approche a consisté à simuler par un modèle éléments finis 3D le mini SST. Cela a permis de valider la méthode de reconstruction du champ en surface par extrapolation linéaire et de s'assurer de l'homogénéité du flux magnétique dans la section d'échantillon enlacée par le bobinage secondaire [3]. De plus, la courbe d'aimantation et les mesures de pertes ont été comparées à celles effectuées sur un SST normalisé (norme CEI 60404-3 [6]). Les deux mesures ont été réalisées sur la même référence de matériau (acier électrique de grade M600A65). Les résultats sont présentés sur la Figure 3 et un très bon accord a été observé entre les mesures effectuées sur les deux bancs. Par exemple, pour atteindre une induction magnétique de 1.5T, l'écart relatif entre les champs magnétiques, mesuré avec le mini-SST et le SST standard, est d'environ 1.15%. De même, pour un même niveau d'induction magnétique de 1.5T, l'écart est égal à 2.3% pour les pertes spécifiques.

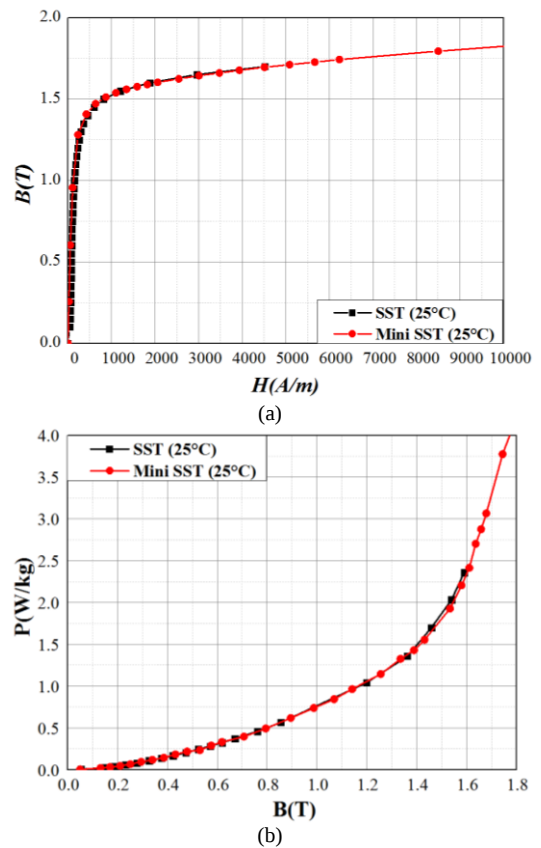


Figure 3. Comparaison des courbes B-H (a) et des pertes fer (b) mesurées sur SST miniaturisé avec celles mesurées sur SST normalisé à température ambiante

2.2.2. Caractérisation électrique

En complément des essais magnétiques, la conductivité électrique est aussi mesurée en fonction de la température en utilisant la méthode des 4 points. Dans cette méthode, quatre points sont alignés en contact par simple pression sur la surface de l'échantillon à analyser permettant d'obtenir une caractéristique liant la tension au courant (Figure 4). Les deux points externes sont utilisés pour injecter un courant continu I , alors que les deux internes mesurent la différence de potentiel V .

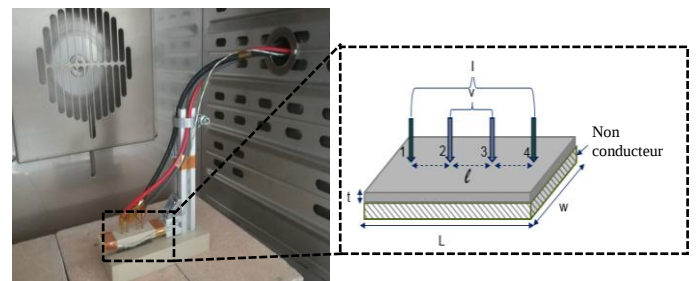


Figure 4. Schéma et photo du dispositif de la mesure par quatre points

La circulation du courant dans l'échantillon n'est pas uniforme entre les pointes de mesure de V . Elle dépend de la forme de l'échantillon et du positionnement des pointes [7]. Pour tenir compte de cela, un facteur de correction F est introduit. Il est déterminé à partir de simulations numériques 3D en électrocinétique basées sur la méthode des éléments finis (code_Carmel) [3]. Ainsi, à partir de la mesure du courant I et de la tension V , la conductivité peut être déduite par :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{I \ell}{V \cdot S} \cdot F \quad (1)$$

avec σ la conductivité électrique, ℓ la distance entre les deux points internes de mesure de tension et S la section de l'échantillon.

2.2.3. Mesure à température élevée

Les deux bancs électriques et magnétiques sont réalisés à base de matériaux qui supportent des températures élevées. Les câbles et isolants des fils de cuivre utilisés résistent à des températures au-delà de 200 °C. Aussi, les supports des maquettes sont réalisés en polyéther éther cétone (PEEK). Le choix de ce matériau est justifié par son faible coefficient de dilatation thermique ($10^{-5} \cdot K^{-1}$) ainsi que sa résistance thermique élevée, de l'ordre des 260°C.

Pour contrôler la température de l'environnement, le banc de caractérisation est placé dans une étuve (Binder, modèle M53) avec une capacité de chauffage allant de 5 °C au-dessus de la température ambiante à 300 °C. L'étuve est également équipée de fonctions de convection forcée et d'une vitesse de ventilateur réglable qui permettent d'avoir une température homogène avec une sensibilité de ± 1 °C. En plus du capteur de température de l'étuve, un thermocouple est placé sur l'échantillon pour vérifier que sa température correspond bien à celle imposée dans l'étude.

3. L'EFFET REVERSIBLE DE LA TEMPERATURE

3.1. Protocole expérimentale

Dans le but d'étudier l'effet de la température sur la conductivité électrique et des caractéristiques magnétiques ($B(H)$ et pertes), deux échantillons ont été extraits par électroérosion à deux endroits différents (plateau et griffe, Figure 1) d'une roue polaire. Le protocole expérimental consiste à placer l'échantillon dans l'étuve, fixer la température de mesure et une fois l'équilibre thermique atteint, réaliser la mesure. On débute à température ambiante (25 °C) puis on augmente par pas de 25 °C la température jusqu'à 200 °C. Enfin, pour s'assurer de la réversibilité de la dépendance en température des propriétés électromagnétiques, une deuxième mesure à température ambiante est réalisée après refroidissement de l'échantillon. Les mesures magnétiques ont été réalisées à différentes fréquences (1 Hz, 5 Hz, 20 Hz, 50 Hz et 100 Hz).

Les mesures ont été systématiquement effectuées sur les deux échantillons pour s'assurer de la reproductibilité des observations.

3.2. Résultats

Les deux échantillons étudiés ont montré des comportements similaires. Par la suite, seuls les résultats de l'un des échantillons seront présentés.

3.2.1. Dépendance en température de la conductivité électrique

Le résultat des mesures de la conductivité électrique à différentes températures est présenté dans la Figure 5. La courbe d'évolution montre, comme on pouvait s'y attendre, une diminution linéaire de la conductivité électrique avec la température. On constate une diminution de la conductivité de 40% à 200 °C par rapport à la température ambiante.

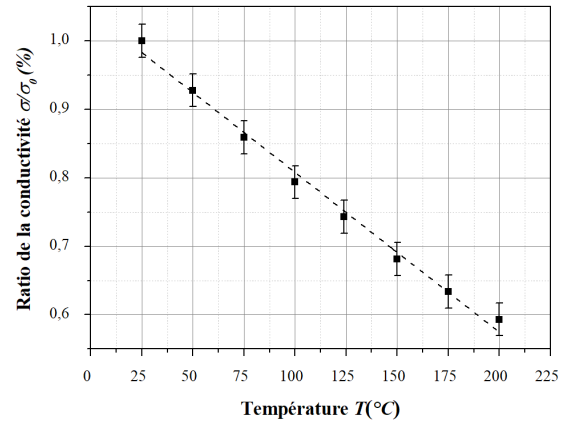


Figure 5. Evolution du ratio de la conductivité électrique ($\sigma(T)/\sigma_0$) en fonction de la température, avec σ_0 la conductivité électrique mesurée à température ambiante

3.2.2. Dépendance en température des propriétés magnétiques

Sur la Figure 6, on reporte la dépendance en température de deux caractéristiques magnétiques à savoir la courbe normale d'aimantation et les pertes fer. En ce qui concerne la courbe normale d'aimantation $B(H)$, obtenue à partir des extrema des cycles d'hystérésis mesurés, l'effet de la température reste peu significatif sur la gamme de variation de température testée. Une très faible diminution de l'induction est observée avec la saturation. Si on s'intéresse aux pertes fer représentées sur la Figure 6(b), on constate une décroissance importante lorsque la température augmente.

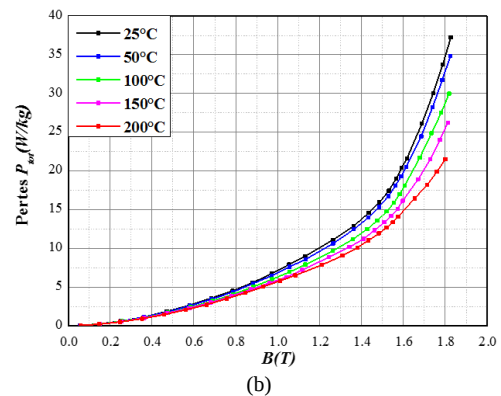
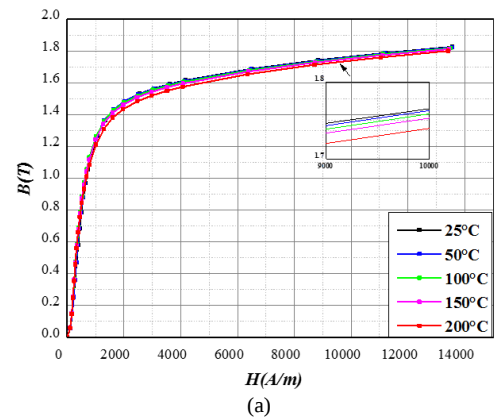


Figure 6. Propriétés magnétiques mesurées à différentes températures à 50Hz, (a) courbes normales et (b) pertes magnétiques

Pour approfondir l'étude de la dépendance en température des pertes, nous avons procédé à une séparation de celles-ci.

Deux contributions, les pertes par hystérésis P_{hys} (statiques) et les pertes dynamiques P_{dyn} ont été distinguées :

$$P_{tot} = P_{hys} + P_{dyn} \quad (2)$$

Les pertes par hystérésis ont été calculées en extrapolant l'énergie spécifique (P_{tot}/f) à $f=0\text{Hz}$ à partir des mesures à différentes fréquences. Ensuite, les pertes dynamiques sont obtenues après soustraction des pertes par hystérésis des pertes totales. Il est à noter que la contribution aux pertes dynamiques inclut les pertes classiques et les pertes excédentaires telles que définies dans l'approche de décomposition de Bertotti [8].

La Figure 7 illustre la dépendance en température des deux composantes de pertes à 1T. On note que les pertes par hystérésis diminuent légèrement avec la température ($0.07\%/^{\circ}\text{C}$) tandis que les pertes dynamiques diminuent plus rapidement en fonction de la température ($0.21\%/^{\circ}\text{C}$).

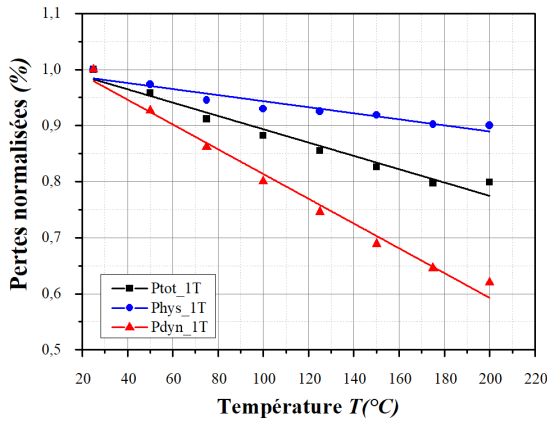


Figure 7. Evolution des pertes magnétiques normalisées ($P(T)/P(25^{\circ}\text{C})$) mesurées à 1T / 50 Hz en fonction de la température.

3.3. Discussion

La température peut agir sur les propriétés électromagnétiques du matériau, et ce via l'agitation thermique.

D'un côté, cette agitation provoque une agitation atomique. Les atomes ionisés oscillent, sans cesse, autour de leur position d'équilibre. Ces mouvements sont de plus en plus importants lorsque la température augmente. Ainsi, l'agitation causée, entrave la circulation des électrons et par conséquent la capacité du matériau à conduire le courant électrique décroît. Ce qui explique la diminution observée sur Figure 5 de la conductivité électrique en fonction de la température.

D'un autre côté, à mesure que la température augmente, l'énergie thermique tend de plus en plus à rompre l'alignement spontané des atomes. En conséquence, l'aimantation et la susceptibilité magnétiques diminuent [9]. Pour la gamme de température considérée, ce comportement est à peine notable. En fait, dans la zone de saturation présentée sur la Figure 6 (a), l'induction magnétique est réduite de 3%.

En ce qui concerne les pertes fer, les deux phénomènes expliqués précédemment interviennent. D'une part, la diminution de la conductivité électrique implique une réduction des courants induits et par conséquent une baisse des pertes dynamiques. D'autre part, la diminution de la perméabilité magnétique est à l'origine de la diminution des pertes par hystérésis. Le même comportement en fonction de la température a été observé sur des tôles de FeSi dans [1], [10]

La dépendance en température observée des propriétés électromagnétiques peut être décrite comme étant un effet

réversible de la température. Comme il est montré sur la Figure 8, pour le cas des pertes magnétiques, après refroidissement, l'échantillon retrouve ses propriétés initiales. Cet aspect de réversibilité a aussi été vérifié pour les autres propriétés. Il faut signaler que les essais ont été effectués sur une courte durée à l'échelle des temps des mécanismes de diffusion atomique et de précipitation si bien que la microstructure est peu modifiée après un cycle de température. Il est alors normal que les phénomènes soient réversibles. Dans la suite nous allons étudier l'influence de la température pour des temps de chauffage plus longs conduisant à une modification de la microstructure.

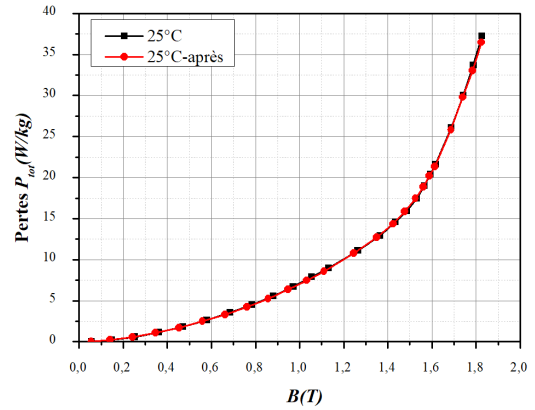


Figure 8. Pertes fer mesurées à température ambiante avant et après essais réversibles en température

4. INVESTIGATION DU VIEILLISSEMENT MAGNETIQUE DE LA RP

Le vieillissement magnétique est le résultat de changements microstructuraux. Il est dû à la précipitation et à la coalescence, principalement aux dislocations, de particules de seconde phase (carbures et/ou nitrure) [11]. Ces précipités d'une certaine taille agissent comme des sites d'épinglage pour les parois de domaine magnétique pendant le processus de magnétisation. En conséquence, les pertes par hystérésis augmentent [2], [11], [12].

La composition chimique ainsi que la température sont des facteurs déterminants pour la précipitation des carbures. Par exemple, la présence du silicium au-dessus de 1% en masse retarde la précipitation des carbures et au-dessus de 3% en masse peut la limiter [5]. Quant au carbone il n'y a pas de vieillissement si sa teneur est très faible [12] et sa présence est au-dessous de sa limite de solubilité dans la ferrite α (2 ppm à 20°C [13]).

Dans le cas de la RP, le matériau constitutif ne comporte pas d'azote, il n'y aura donc pas de précipitation de nitrure. Cependant, les conditions de fonctionnement dans la machine (température proche de 200°C), sa faible teneur en silicium ($\% \text{Si} < 0.6\%$), ainsi que sa teneur en carbone ($\% \text{C} \sim 0.06\%$), favorisent la précipitation des carbure et suggèrent, au vu de l'état de l'art, une modification de la microstructure et donc des modifications irréversibles des caractéristiques électromagnétiques (vieillissement magnétique).

4.1. Protocole expérimental

L'étude du vieillissement a été menée sur deux échantillons extraits de la même zone (plateau, Figure 1) de la roue polaire. Après une première caractérisation magnétique, l'un des échantillons a été gardé comme référence pour l'analyse de microstructure alors que le deuxième a subi un traitement de vieillissement isotherme à 180°C pendant une durée totale de 60h avec une montée en température rapide (5 min) et un

refroidissement modéré (5 min). A intervalles réguliers durant le traitement thermique, l'échantillon a été caractérisé à température ambiante pour suivre l'évolution de ses propriétés magnétiques tout au long du vieillissement. Enfin, les deux échantillons (vieilli et non vieilli) ont été polis et préparés pour être analysés par Microscopie Electronique à Balayage (MEB).

4.2. Résultats

Les résultats obtenus ont montré une nette évolution des propriétés magnétiques suite au processus de vieillissement thermique appliqué. Sur la Figure 9, on compare les cycles d'hystérésis mesurés avant vieillissement et après 30 heures de traitement à 180°C. On remarque que le cycle d'hystérésis s'est élargi indiquant une augmentation du champ coercitif et des pertes. Par contre, aucune modification significative n'a été observée sur la courbe normale B(H) après le processus de vieillissement.

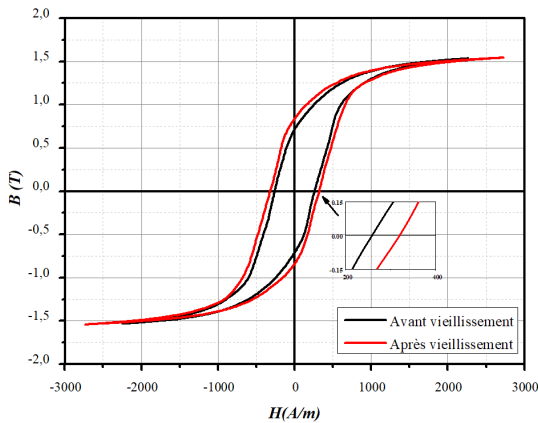


Figure 9. Cycles d'hystérésis mesurés sur le deuxième échantillon à 20 Hz / 1.5 T avant et après 30 heures de vieillissement thermique à 180 °C

Sur la Figure 10, on reporte l'évolution de l'indice de vieillissement (AI) calculé à partir des pertes fer totales en fonction du temps du vieillissement défini par :

$$AI(t) = \frac{P(t) - P_0}{P_0} \quad (3)$$

avec $P(t)$ les pertes mesurées après une durée t du traitement de vieillissement et P_0 les pertes initiales mesurées avant vieillissement. On remarque que l'indice de vieillissement augmente significativement de 9% durant les 20 premières heures puis tend à se stabiliser.

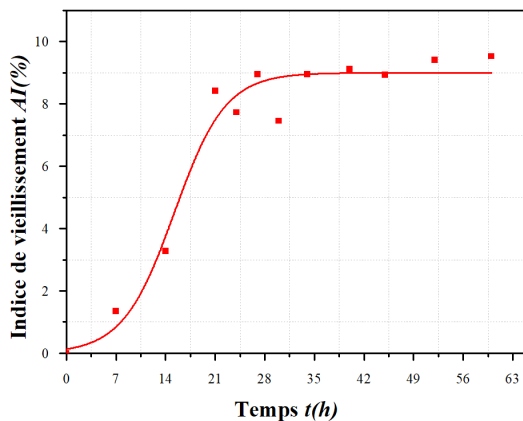


Figure 10: Evolution de l'indice du vieillissement (AI) en fonction du temps pour l'échantillon vieilli à 180°C.

Afin de corréler cette observation macroscopique avec les mécanismes de précipitation de carbures, les résultats de l'analyse microstructurale sont présentés sur la Figure 11. Il s'agit de deux images obtenues par MEB. La première est issue du premier échantillon non vieilli alors que la deuxième provient du deuxième échantillon ayant subi l'intégralité du traitement thermique (60h).

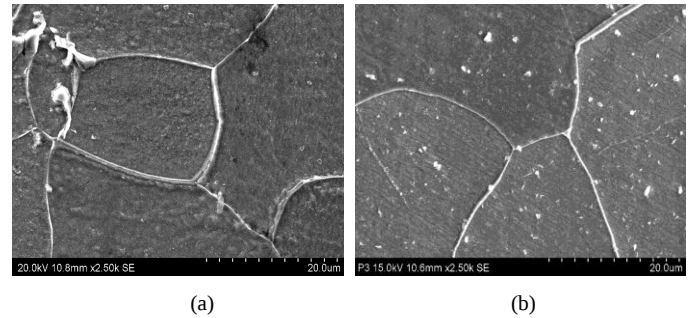


Figure 11. Image MEB des deux échantillons (a) non vieilli et (b) vieilli pendant 60 heures à 180°C.

4.3. Discussion

Au cours du traitement thermique, les mécanismes de diffusion du carbone sursaturé dans la ferrite α sont activés. D'après les lois de Fick, après 21 heures du traitement à cette température, la distance parcourue par l'atome de carbone qui diffuse est de l'ordre de $6 \mu m$ [14]. Le carbone peut donc diffuser et former des précipités de carbures, préférentiellement, dans les dislocations [15].

En comparant les deux images, présentées dans Figure 11, on remarque l'apparition de taches blanches intragranulaires qui sont plus visibles et plus nombreuses sur l'image de l'échantillon vieilli. Ces taches blanches représentent les précipités de carbures formés lors du vieillissement par le traitement thermique contrôlé. Un comportement similaire a été observé sur des tôles FeSi [11].

D'un point de vue magnétique, la présence de ces précipités affecte le mouvement des parois de domaines, via les mécanismes d'ancrage, augmentant la coercitivité magnétique et la dissipation d'énergie. Ainsi, comme il est noté sur la Figure 9, le champ coercitif et les pertes fer augmentent avec le temps de traitement. En particulier, si on considère la décomposition de pertes définie par l'équation (2), les pertes par hystérésis se révèlent être les plus sensibles à la présence de ces particules [11], [12], [16]. Aussi, il a été rapporté que l'effet des précipités devient de plus en plus important quand leur taille moyenne devient proche de l'épaisseur de la paroi de domaine [12]. Cependant, une fois qu'elle dépasse l'ordre de l'épaisseur de la paroi de domaines, elle ne peut plus causer de dégradations. Ceci peut expliquer, en partie, l'évolution de l'AI (Figure 10) et la stabilisation observée après 21 heures de vieillissement.

Suite à cette étude d'investigation du vieillissement, on peut conclure que la température de fonctionnement de la roue polaire modifie, avec le temps, la microstructure de l'acier via la formation des précipités. En conséquence, la coercitivité croît et cause une augmentation des pertes fer sans modifier la courbe normale B(H). Cet effet est jugé irréversible dans la mesure où pour revenir aux propriétés de l'acier avant vieillissement, il serait nécessaire de réduire les précipités afin de retrouver une microstructure similaire à celle initiale. Cela peut s'obtenir par une remise en solution par traitement thermique haute température.

5. CONCLUSIONS

Le présent travail étudie les effets réversibles et irréversibles de la température de fonctionnement de la RP sur son comportement électromagnétique. Dans un premier temps, une méthode de caractérisation jusqu'à 200°C des propriétés électromagnétiques des matériaux massifs a été proposée. Les résultats de caractérisation en fonction de la température ont montré que, pour le matériau considéré, la conductivité électrique ainsi que les pertes fer diminuent avec la température. Cette observation s'explique en partie par la diminution de la conductivité avec la température. Dans un second temps, le vieillissement magnétique de la RP a été investigué. Les résultats obtenus ont montré une détérioration des propriétés magnétiques, notamment une augmentation des pertes suite à la précipitation des carbures. Ces résultats montrent que les effets des conditions de fonctionnement d'une machine sur les propriétés de matériaux magnétiques, notamment les pertes fer, doivent être prises en compte lors de la phase de conception d'une machine pour obtenir une simulation réaliste de ses performances.

6. REFERENCES

- [1] C. W. Chen, "Temperature Dependence of Magnetic Properties of Silicon-Iron," *J. Appl. Phys.*, vol. 29, no. 9, pp. 1337–1343, Sep. 1958, doi: 10.1063/1.1723438.
- [2] S. K. Ray and O. N. Mohanty, "Magnetic ageing characteristics of low silicon electrical steels," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 44–50, Jul. 1982, doi: 10.1016/0304-8853(82)90027-0.
- [3] M. Jamil, A. Benabou, S. Clénet, L. Arbenz, and J.-C. Mipo, "Development and validation of an electrical and magnetic characterization device for massive parallelepiped specimen," *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, pp. S1–S8, Jun. 2019, doi: 10.3233/JAE-191491.
- [4] M. Borsenberger, "Contribution à l'identification de l'interaction paramètres procédés – propriétés d'emploi des produits : Application au forgeage et aux propriétés électromagnétiques d'une roue polaire d'alternateur," thesis, Paris, ENSAM, 2018.
- [5] H. Naumoski, B. Riedmüller, A. Minkow, and U. Herr, "Investigation of the influence of different cutting procedures on the global and local magnetic properties of non-oriented electrical steel," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 392, pp. 126–133, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.jmmm.2015.05.031.
- [6] "Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame (IEC Central Office)." IEC Standard Publication 60404-2, 1996.
- [7] F. M. Smits, "Measurement of Sheet Resistivities with the Four-Point Probe," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 37, no. 3, pp. 711–718, May 1958, doi: 10.1002/j.1538-7305.1958.tb03883.x.
- [8] G. Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, no. 1, pp. 621–630, Jan. 1988, doi: 10.1109/20.43994.
- [9] R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*. 1993.
- [10] N. Takahashi, M. Morishita, D. Miyagi, and M. Nakano, "Examination of Magnetic Properties of Magnetic Materials at High Temperature Using a Ring Specimen," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 2, pp. 548–551, Feb. 2010, doi: 10.1109/TMAG.2009.2033122.
- [11] J. R. de Oliveira Júnior *et al.*, "Kinetics of Magnetic Ageing of 2%Si Non-oriented Grain Electrical Steel," *Mater. Res.*, vol. 21, no. 1, 2018, doi: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0575.
- [12] M. F. de Campos, M. Emura, and F. J. G. Landgraf, "Consequences of magnetic aging for iron losses in electrical steels," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 304, no. 2, pp. e593–e595, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.jmmm.2006.02.185.
- [13] M. Grumbach, "Vieillissement des aciers," p. 23, 1993.
- [14] G. Murry, *Aide-mémoire - Métallurgie Métaux, Alliages, Propriétés*. Paris: Dunod.
- [15] S. K. Ray and O. N. Mohanty, "TEM Investigation of Carbide Precipitation in Low Carbon Steels Containing Silicon," *Trans. Jpn. Inst. Met.*, vol. 24, no. 2, pp. 81–87, 1983, doi: 10.2320/matertrans1960.24.81.
- [16] G. M. R. Negri, N. Sadowski, N. J. Batistela, J. V. Leite, and J. P. A. Bastos, "Magnetic Aging Effect Losses on Electrical Steels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 5, pp. 1–4, May 2016, doi: 10.1109/TMAG.2016.2517942.