

Influence de la déformation plastique sur le comportement magnéto-mécanique d'un acier doux

Mathieu DOMENJOU^{1,2}, Ikram HAMMOU^{1,2}, Laurent DANIEL^{1,2}

¹Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 91192, Gif-sur-Yvette

² Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 75252, Paris, France

RESUME – Les propriétés de systèmes électromécaniques sont intimement liées à celles des matériaux utilisés pour leur conception. Lors de leurs mise en forme, ces matériaux subissent des contraintes mécaniques impactant leur comportement magnétique. Ce travail présente la caractérisation magnéto-mécanique du matériau d'un stator (acier DC04) sous différents niveaux de déformation plastique (ϵ_p) et de contrainte mécanique (traction). La sensibilité du comportement magnétique de ce matériau est très importante, dès les premiers stades de la plasticité ($\epsilon_p < 0.25\%$). L'effet diminue, puis sature au-delà. Les évolutions de l'induction rémanente et du champ coercitif en fonction de ϵ_p illustrent l'impact de la plasticité sur les propriétés magnétiques de ce matériau.

Mots-clés – acier DC04, caractérisation magnéto-mécanique, traction uniaxiale, dégradation des propriétés magnétiques.

1. INTRODUCTION

Les matériaux magnétiques sont communément utilisés pour la réalisation de machines électriques, d'actionneurs, de transducteurs. Les performances de ces dispositifs sont fortement dépendantes des sollicitations mécaniques subies par le matériau lors du procédé de fabrication [1–4]. Les outils de modélisation de ces systèmes nécessitent de disposer de lois de comportement précises et prédictives de ces matériaux. Cependant, l'impact des déformations plastiques sur le comportement magnéto-élastique de matériaux magnétiques est encore mal maîtrisé. Ce travail étudie l'influence de la plasticité sur les propriétés magnétiques du stator d'un actionneur. Celui-ci est usiné par emboutissage d'un acier laminé à froid par Arcelor Mittal : l'acier DC04. Nous commençons par présenter le dispositif expérimental. Dans une seconde partie, nous présentons les résultats de caractérisation magnétique (cycles majeurs) obtenus pour différents niveaux de déformations plastiques. Les évolutions de l'induction magnétique rémanente et du champ coercitif en fonction du niveau de déformation plastique sont discutées.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental est adapté aux mesures d'induction magnétique (B) et de déformation longitudinale (ϵ) de matériaux ferromagnétiques soumis simultanément à un champ magnétique (H) et à un niveau de contrainte mécanique (σ) statique et uniaxiale (dans la direction du champ H appliqué). Une machine de traction-compression (Zwick/Roell Z030) ainsi que des mors de capacité 30 kN sont utilisés pour l'application de la contrainte de traction. Le circuit magnétique, constitué de deux U en Fer-Silicium, assure la fermeture du champ magnétique, généré par une bobine primaire, alimentée par un amplificateur de puissance (Kepco 72-14MG). Le dispositif de caractérisation est présenté sur la figure 1. Les dimensions des échantillons de DC04 (250 mm $\times$ 20 mm $\times$ 2 mm) assurent l'homogénéité du champ magnétique et de la contrainte mécanique dans la zone centrale (zone de mesure) de l'échantillon.

La force est mesurée par un capteur de force. L'induction

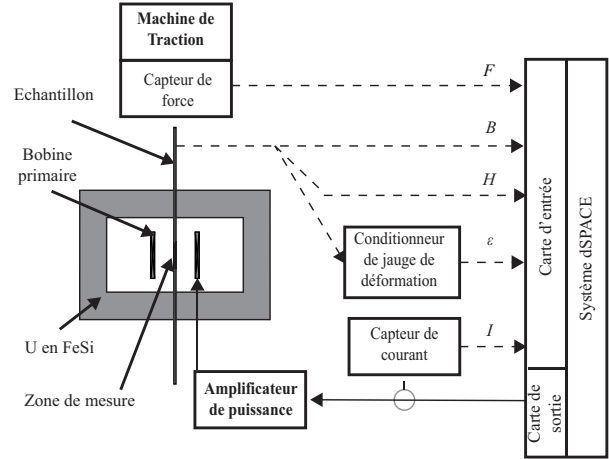


Fig. 1. Représentation du dispositif de caractérisation magnéto-mécanique.

magnétique dans l'échantillon est mesurée grâce à une B-Coil entourant ce dernier. Le champ magnétique est mesuré en surface de l'échantillon par un Gaussmètre. Les niveaux de déformation longitudinale sont évalués par une jauge de contrainte collée sur l'échantillon. L'acquisition des mesures, la génération des signaux d'excitations et de contrôle sont assurés par un module dSPACE cadencé à 50 kHz [5].

3. RÉSULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSIONS

3.1. Comportement mécanique

La figure 2 présente la mesure du comportement mécanique stabilisé du DC04, en allant jusqu'à la limite de striction du matériau ($\epsilon \approx 25\%$) [6]. La contrainte considérée est la contrainte de Cauchy (σ_{Cauchy}) qui relie la force appliquée à la surface du matériau à l'état contraint. Une fois la limite élastique dépassée ($\sigma \approx 150$ MPa), chacun des états plastiques obtenus a été stabilisé (relaxation de la composante viscoplastique de la contrainte d'écoulement) [7]. Le comportement observé est cohérent avec les résultats de la littérature (module d'Young, limite élastique, comportement mécanique en traction, limite de striction) [6]. Différents niveaux de déformation plastique ont ainsi été obtenus : 0.017, 0.045, 0.073, 0.142, 0.492, 1.05, 2.71, 5.36, 8.84, 15.6, et 24.2%.

3.2. Comportement magnétique du matériau plastifié

Pour chaque niveau de ϵ_p obtenus (figure 2), le comportement magnétique du matériau a été mesuré à l'état déchargé ($\sigma = 0$). L'excitation magnétique est sinusoïdale (3 cycles, 1 Hz) pilotée en courant. L'état de référence pour la mesure de B est l'état désaimanté [5].

La figure 3 présente l'évolution de l'induction magnétique en

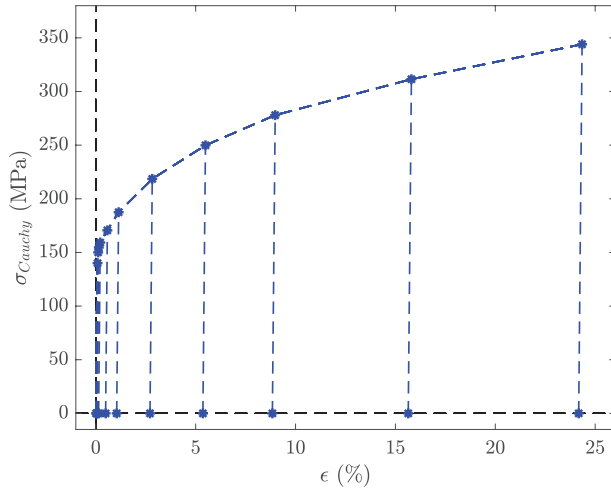


Fig. 2. Loi de comportement mécanique stabilisé du DC04 (contrainte de traction).

fonction du champ magnétique pour différents niveaux de déformation plastique. Le comportement magnétique du DC04 est très dépendant du niveau de ϵ_p , surtout à faible niveau ($\epsilon_p < 1\%$). Ces observations sont classiquement observées sur des matériaux ferromagnétiques plastifiés [8, 9].

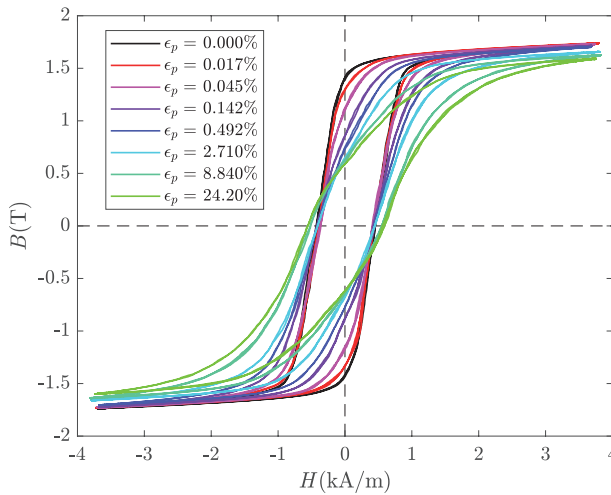


Fig. 3. Comportement magnétique du DC04 sous différents niveaux de déformation plastique (ϵ_p), à l'état relâché ($\sigma = 0$).

La figure 4 présente l'évolution de l'induction magnétique rémanente (B_r) et du champ magnétique coercitif (H_c) en fonction des différents niveaux de déformation plastique.

La plasticité induit de grandes variations des paramètres magnétiques B_r et H_c . B_r décroît fortement jusqu'à $\epsilon_p = 0.25\%$. Au delà de cette valeur, cette décroissance diminue, puis sature. A faible niveau de ϵ_p , la plasticité induit une évolution faible de H_c tant que $\epsilon_p < 0.25\%$. Au delà de cette valeur, la croissance de H_c en fonction du niveau de ϵ_p est significative.

4. CONCLUSION

L'étude menée évalue le comportement magnéto-mécanique d'un acier utilisé dans la conception du stator d'un actionneur magnéto-mécanique, sous traction uniaxiale jusqu'à un niveau de déformation plastique proche de la striction. Les résultats expérimentaux montrent que le comportement magnéto-mécanique du DC04 est très sensible au niveau de plasticité. Cette sensibilité décroît quand $\epsilon_p > 1\%$. La dépendance de l'induction rémanente et du champ coercitif est non monotone. Ces

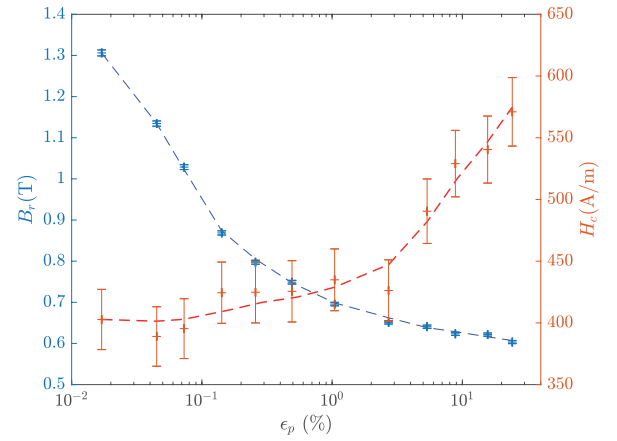


Fig. 4. Évolutions de l'induction rémanente et du champ magnétique coercitif en fonction du niveau de déformation plastique (ϵ_p), à l'état relâché ($\sigma = 0$). Les lignes pointillées indiquent les tendances des comportements.

deux paramètres sont très sensibles aux valeurs de déformation plastique. Ce travail montre que de faibles niveaux de déformation plastique dégradent fortement les propriétés magnétiques de ce matériau.

5. REMERCIEMENTS

Ces résultats ont été obtenus dans le cadre d'un partenariat avec la société Moving Magnet Technologies (MMT), 1 Rue Christiaan Huygens, 25000 Besançon.

6. RÉFÉRENCES

- [1] O. HUBERT et E. HUG, « Influence of plastic strain on magnetic behaviour of non-oriented Fe-3Si and application to manufacturing test by punching », *Mater. Sci. Technol.*, vol. 11, p. 482–487, may 1995.
- [2] A. SCHOPPA, J. SCHNEIDER, C.-D. WUPPERMANN et T. BAKON, « Influence of welding and sticking of laminations on the magnetic properties of non-oriented electrical steels », *J Magn Magn Mater*, vol. 254–255, p. 367–369, jan 2003.
- [3] E. G. ARAUJO, J. SCHNEIDER, K. VERBEKEN, G. PASQUARELLA et Y. HOUBAERT, « Dimensional effects on magnetic properties of Fe-Si steels due to laser and mechanical cutting », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, p. 213–216, feb 2010.
- [4] N. LEUNING, S. STEENTJES, H. A. WEISS, W. VOLK et K. HAMEYER, « Magnetic material deterioration of non-oriented electrical steels as a result of plastic deformation considering residual stress distribution », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, p. 1–5, nov 2018.
- [5] M. DOMENJOU, E. BERTHELOT, N. GALOPIN, R. CORCOLLE, Y. BERNARD et L. DANIEL, « Characterization of giant magnetostrictive materials under static stress : influence of loading boundary conditions », *Smart Mater. Struct.*, vol. 28, p. 095012, aug 2019.
- [6] A. LE PORT, *Caractérisation et prédiction des défauts d'aspect des ouvrants automobiles*. Thèse doctorat, Université de Bretagne Sud, 2010.
- [7] V.-E. IORDACHE, *Suivi de l'état de contraintes, appliquées et internes, des alliages ferromagnétiques doux par mesure de leur propriétés magnétiques*. Thèse doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2003.
- [8] R. M. BOZORTH et H. J. WILLIAMS, « Effect of small stresses on magnetic properties », *Rev. Mod. Phys.*, vol. 17, p. 72–80, jan 1945.
- [9] E. HUG, O. HUBERT et M. CLAVEL, « Some aspects of the magnetomechanical coupling in the strengthening of nonoriented and grain-oriented 3% SiFe alloys », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 1, p. 763–771, 1997.