

Caractérisation de comportement magnétique des aciers de structure par le bruit de Barkhausen.

Patrick FAGAN, Anastasios SKARLATOS, Benjamin DUCHARNE

Commissariat à l'énergie atomique (CEA-LIST), Gif sur Yvette, France.

Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité – INSA de Lyon, Villeurbanne, France.

RESUME – L'utilisation du contrôle magnétique pour l'évaluation non-destructive des aciers de structure a fortement progressé ces dernières années. La mesure du bruit de Barkhausen liée à la vitesse des parois des domaines magnétiques renvoie en particulier des informations précises sur le contenu microstructural des matériaux testés. De fait de sa nature stochastique le bruit électromagnétique de Barkhausen mesuré en sortie de capteur est difficile à analyser. Après un traitement en post-processing et une normalisation, il est possible de remonter à des cycles d'hystérésis énergétiques à partir de la mesure bruit de Barkhausen. Ces cycles locaux sont beaucoup plus stables et reproductifs. Ils offrent un accès contrôlé à l'évolution de la microstructure du matériau testé (contraintes internes, niveau de dégradation ...) et en font un outil incontournable de l'évaluation non destructive des aciers ferromagnétiques. Dans cette étude nous proposons une modélisation de ces cycles énergétiques et indirectement de l'enveloppe du bruit haute fréquence de Barkhausen.

Mots-clés—Bruit de Barkhausen, cycle d'hystérésis, contraintes mécaniques, modélisation, contrôle non destructif.

1. INTRODUCTION

L'utilisation de techniques de contrôle non destructives micro-magnétiques comme la mesure du bruit magnétique de Barkhausen a récemment augmenté de façon exponentielle dans le milieu industriel. Ce regain d'intérêt est principalement dû à l'amélioration des techniques analogiques et numériques de traitement du signal qui ont permis d'intégrer ce type de contrôle qualité sur des lignes de production. Les techniques micro-magnétiques permettent de remonter à des propriétés intéressantes des échantillons testés (dureté, contraintes résiduelles, brulure de rectification ...). Le bruit de Barkhausen doit son origine aux processus de magnétisation d'un matériau ferromagnétique. Il est établi qu'un matériau ferromagnétique, dans un état désaimanté, est magnétiquement divisé en régions finies nommées domaines magnétiques. Chaque domaine se caractérise par une direction et une orientation d'aimantation qui lui est propre. Le processus d'aimantation consiste à convertir cet état multi-domaine en un état domaine unique caractérisé par une orientation et un sens de magnétisation très proche de ceux du champ magnétique externe H soumis au matériau. Ce processus n'est pas continu mais se caractérise par de petites variations discrètes : saut d'un défaut d'ancrage (obstacles micro-structuraux : précipitations, inclusions ...) vers un autre point d'ancrage. Cette variation locale de l'état d'aimantation est appelée « événement Barkhausen ». Ces changements brusques,

locaux, induisent des courants de Foucault pulsés à proximité et à travers les parois des domaines magnétiques en mouvement qui se développent dans toutes les directions spatiales. Ces modifications brutales de la structure magnétique au sein du matériau induisent également des variations de flux local et rapide qui peuvent être facilement mesurées à l'aide de micro capteurs de champ magnétique dédié. Il est intéressant de spécifier que le processus d'aimantation n'est pas seulement limité au mouvement des parois des domaines magnétiques mais inclut également de la rotation de l'orientation des domaines magnétiques. Ceci est particulièrement vrai lorsque l'état magnétique moyen du matériau testé est proche de l'état saturé. De part, sa nature intrinsèquement stochastique le bruit électromagnétique de Barkhausen mesuré en sortie de capteur est difficile à analyser. Depuis toujours, on a cherché à le remplacer et le traiter pour obtenir des indicateurs beaucoup plus stables et reproductifs, telle que son enveloppe [1] ou sa valeur efficace [2]. Dans notre laboratoire depuis quelques années maintenant, nous avons opté pour un autre paramètre appelé l'énergie magnétique Barkhausen (magnetic Barkhausen noise energy en anglais : MBN_{energy}) [3]-[5] qui consiste en un traitement en post-processing et une normalisation. A la suite de ce traitement, il est possible de remonter à des cycles d'hystérésis énergétiques à partir de la mesure du bruit de Barkhausen. Ces cycles locaux sont beaucoup plus stables et reproductifs. Le MBN_{energy} est obtenu à partir de l'intégration temporelle du carré de la tension en sortie du capteur de champ magnétique local. Cette technique « post-traitement » permet de remonter à une boucle d'hystérésis $MBN_{energy}(H)$ à partir de la mesure locale du bruit magnétique de Barkhausen. A basse fréquence, si le matériau est homogène et anisotrope (FeSi à grains orientés, par exemple), après normalisation via un coefficient v et dans des situations de caractérisation colinéaire (cadre 1 bande, cadre Epstein ...), la comparaison avec des cycles d'hystérésis classiques $B(H)$ (équation 1) et des cycles énergétiques $MBN_{energy}(H)$ (équation 2) obtenue à partir d'un même capteur encerclant présentent des allures très similaires.

$$B(H) = \left(\frac{1}{n.S} \cdot \int_0^T e(t).dt \right) (H) \quad (2)$$

$$MBN_{energy}(H) = \left(v \cdot \int_0^T \text{sign} \left(\frac{dH}{dt} \right) \cdot (V_{Barkhausen})^2 \cdot dt \right) (H) \quad (1)$$

Cette observation se justifie en considérant que ce type de matériau présente une direction de facile aimantation extrêmement marquée avec une majorité de parois de domaine dite à 180° et dont la contribution dans le processus d'aimantation et de trajectoire du cycle d'hystérésis sera prépondérante. Ceci confirme également l'origine microscopique à basse fréquence (mouvements de parois) de l'hystérésis magnétique.

Dans cet article, nous proposons un schéma numérique simple basé sur la modélisation locale de l'hystérésis magnétique et sur l'énergie magnétique Barkhausen capable de retourner l'évolution temporelle locale de l'enveloppe du bruit Barkhausen. Basée sur la séparation des contributions (rotation, mouvement de parois), la simulation doit nous permettre d'obtenir des informations intéressantes, en l'associant dans un deuxième temps aux effets des contraintes mécaniques sur l'évolution du comportement magnétique elle devrait à terme permettre d'établir une cartographie de la distribution des contraintes résiduelles à travers le matériau testé.

2. MODELISATION LOCALE DE L'HYSTERESIS MAGNETIQUE

La modélisation locale la plus efficace de l'hystérésis magnétique repose sur une discrétisation spatiale de l'échantillon modélisé. Ceci correspond à une résolution simultanée par différences ou éléments finis de l'équation de diffusion et d'une loi hystérétique de matériau. Si l'on suppose que l'échantillon est homogène que l'on se place dans les conditions de caractérisation classique du bruit de Barkhausen ($f < 1$ Hz) similaires à celles décrites dans la partie caractérisation de cet article, il est concevable de supposer que le champ d'excitation et la distribution de l'état magnétique du matériau sont homogènes et qu'une modélisation à constante localisée, résolution de la loi de matériau est suffisante pour rendre compte correctement du comportement magnétique.

2.1. Loi de matériau, modèle de l'hystérésis quasi-statique

Au-delà d'une fréquence seuil (dans la direction décroissante), le cycle d'hystérésis devient indépendant de la fréquence, cet état est dit quasi statique et est généralement atteint pour des fréquences inférieures à 1Hz. Différentes approches sont disponibles dans la littérature pour la simulation de l'hystérésis quasi statique [6]-[8]. Parmi tous ces modèles, il semble que ceux proposés par Preisach et Jiles-Atherton soient de loin les plus utilisés [9][10]. Dans cette étude, où nous cherchons à séparer les contributions (mouvements de parois et rotation), il semble que l'unique modèle de Jiles-Atherton nous offre une telle flexibilité.

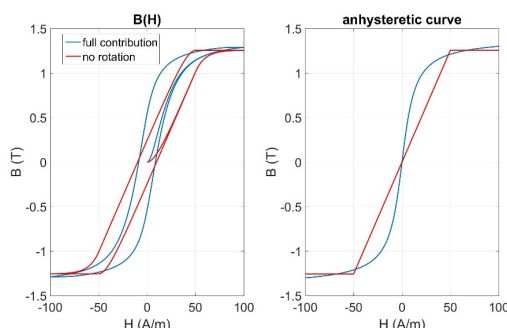


Fig. 2. Banc de caractérisation dédié.

En effet, en jouant sur l'allure de la caractéristique anhysterétique, il est possible de privilégier la contribution des mouvements de parois sur la rotation. A l'état quasi-statique, l'hystérésis, retard de l'état magnétique (champ d'induction) par rapport au stimulus extérieur (champ d'excitation magnétique)

ne doit son origine qu'aux courants de Foucault microscopiques (mouvements de parois), il n'est donc pas nécessaire de le modifier et en jouant uniquement sur la contribution anhysterétique, il est concevable d'obtenir une modélisation dans laquelle la rotation est inexistante. La figure 1 ci-dessus présente un cycle classique (bleu) et un cycle uniquement constitué de la contribution des mouvements de parois (rouge) obtenus à partir du modèle de Jiles-Atherton modifié. Les courbes anhysterétiques correspondantes sont présentées sur la figure de droite.

3. COMPARAISON SIMULATION/RESULTATS EXPERIMENTAUX

Un banc de caractérisation dédié a été développé pour la validation expérimentale de notre théorie (fig. 1). Celui-ci sera présenté en détail dans la version étendue de cet article.

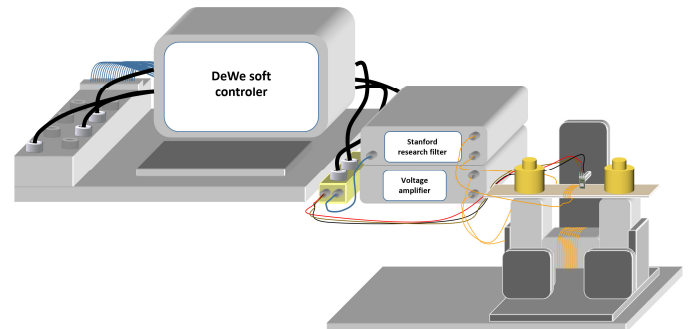


Fig. 2. Banc de caractérisation dédié.

6. CONCLUSION

Dans la version finale de cet article nous expliquerons comment le modèle multi-échelle a été utilisé pour séparer les contributions et obtenir une courbe anhysterétique uniquement constituée des mouvements de parois. De nombreux résultats de simulations et de caractérisations (cycles classiques, cycles MBN_{energy}) seront comparés afin de valider notre théorie.

7. REFERENCES

- [1] X. Kleber, A. Vincent, "On the role of residual internal stresses and dislocations on Barkhausen noise in plastically deformed steel", *NDT & E Int.*, vol. 37, Iss. 6, pp. 439-445, 2004.
- [2] A. Lasiosa, K. Gurruchaga, F. Arizti, "Induction hardened layer characterization and grinding burn detection by magnetic Barkhausen noise analysis", *J. of Nondestructive Ev.*, 2017.
- [3] B. Ducharme, M.Q. Le, G. Sebald, P.J. Cottinet, D. Guyomar, Y. Hebrard, "Characterization and modeling of magnetic domain wall dynamics using reconstituted hysteresis loops from Barkhausen noise", *J. of Mag. And Mag. Mat.*, pp. 231-238, 2017.
- [4] B. Ducharme, B. Gupta, Y. Hebrard, J. B. Coudert, "Phenomenological model of Barkhausen noise under mechanical and magnetic excitations", *IEEE Trans. on Mag.*, vol. 99, pp. 1-6, 2018.
- [5] B. Gupta, B. Ducharme, T. Uchimoto, G. Sebald, T. Miyazaki, T. Takagi, "Non-destructive testing on creep degraded 12% Cr-Mo-W-V ferritic test samples using Barkhausen noise", *J. of Mag. And Mag. Mat.*, pp. 231-238, 2019.
- [6] F. Preisach, "Über die magnetische Nachwirkung". *Zeitschrift für Physik*, 94: 277-302, 1935.
- [7] D.C. Jiles, D.L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis". *J. App. Phys.* 55, pp. 2115, 1984.
- [8] B. Ducharme, D. Guyomar, G. Sebald, "Low frequency modelling of hysteresis behaviour and dielectric permittivity in ferroelectric ceramics under electric field", *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, iss. 2, pp. 551-555, 2007.
- [9] B. Zhang, B. Gupta, B. Ducharme, G. Sebald, T. Uchimoto, "Preisach's model extended with dynamic fractional derivation contribution", *IEEE Trans. on Mag.*, vol. 54, iss. 3, 2017.
- [10] B. Zhang, B. Gupta, B. Ducharme, G. Sebald, T. Uchimoto, "Dynamic magnetic scalar hysteresis lump model, based on Jiles-Atherton quasi-static hysteresis model extended with dynamic fractional derivative contribution", *IEEE Trans. on Mag.*, iss. 99, pp. 1-5, 2018.