

# Caractérisation et modélisation phénoménologique locale du bruit de Barkhausen sous contrainte de champs magnétique et mécanique.

Bhaawan Gupta<sup>1,2</sup>, Yoann Hebrard<sup>3</sup>, Jean-Baptiste Coudert<sup>3</sup>, Benjamin Ducharme<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité – INSA de Lyon  
Bât. Gustave FERRIE, 8 rue de la physique, 69621 Villeurbanne cedex, France

<sup>2</sup>ELyTMAX UMI 3757, CNRS – Université de Lyon – Tohoku University,  
International Joint Unit, Tohoku University, Sendai, JAPAN

<sup>3</sup>SKF, Valence, FRANCE

**RESUME** - Après traitement et normalisation, il est possible de tracer des cycles d'hystérésis locaux à partir de la mesure du bruit magnétique de Barkhausen. Si le matériau est homogène et dans des conditions d'excitation similaires les cycles obtenus sont comparables aux cycles d'hystérésis magnétiques classiques  $B(H)$  (Induction magnétique  $B$  en fonction du champ d'excitation tangentiel de surface  $H$ ). Les cycles locaux du bruit Barkhausen donnent des indices intéressants quant à l'évolution de la microstructure du matériau magnétique (contraintes internes, niveau de dégradation ...). Ceci en fait un outil incontournable de l'évaluation non destructive des aciers ferromagnétiques. Dans cet article nous proposons une modélisation phénoménologique du bruit de Barkhausen à partir de la modélisation locale de  $B$  soumise à un champ  $H$  et/ou une contrainte mécanique unie axiale avec comme objectif ultime une quantification des contraintes internes résiduelles par la mesure 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, même dans un état démagnétisé, est magnétiquement divisé en régions finies nommées domaines. Chaque domaine se caractérise par sa propre direction et orientation de magnétisation. Le processus d'aimantation consiste à convertir cet état multi-domaine en un domaine unique caractérisé par une orientation et un sens de magnétisation très proche du champ magnétique externe  $H$  soumis au matériau. Ce processus n'est pas continu mais consiste en de petites variations discrètes : saut

d'un défaut d'ancrage (obstacles micro-structurels: précipitations ...) vers un autre point d'ancrage des parois de domaine (frontière entre deux domaines). Cette variation locale de l'état de magnétisation est appelée « événement Barkhausen ». Ces changements induisent des courants de Foucault pulsés à proximité des murs de domaine en déplacement 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 capteur de champ magnétique dédié. Dans de récentes publications traitant du sujet, les auteurs définissent un nouveau paramètre appelé l'énergie magnétique Barkhausen (magnetic Barkhausen noise energy en anglais :  $MBN_{energy}$ ) [1]. 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 isotrope et après normalisation via un coefficient  $\nu$  par comparaison aux cycles d'hystérésis classiques  $B(H)$  et recentrage, les cycles Barkhausen obtenus présentent une allure très proche des cycles d'hystérésis classiques.

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

Ceci confirme 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 local de l'enveloppe du bruit Barkhausen pour différent niveau statique imposé de contrainte mécanique. Dans cet article, nous nous intéresserons dans un premier temps qu'au cas d'une contrainte mécanique uni axiale. La simulation doit nous permettre d'obtenir des informations intéressantes, elle peut être utilisée en parallèle à de la cartographie expérimentale du bruit de Barkhausen d'échantillons contrôlés et de remonter indirectement aux distributions des contraintes résiduelles

mécaniques. Pour valider l'exactitude de la simulation numérique, un banc de caractérisation dédié a été développé, dans la version finale de l'article, ce banc sera décrit en détail et un grand nombre de comparaison mesures/simulations seront proposées pour illustrer l'efficacité de la technique.

## 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 et la 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 et isotrope et qu'on se place dans les conditions de caractérisation classique du bruit de Barkhausen ( $f < 1$  Hz), il est concevable de supposer que le champ d'excitation et la distribution de l'état magnétique du matériau sont homogènes et que la simulation 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 [2]-[4]. Parmi tous ces modèles, il semble que ceux proposés par Preisach et Jiles-Atherton soient de loin les plus utilisés. Dans cette étude, les deux ont été testés et l'un comme l'autre peuvent être utilisés car le niveau de précision requis est atteint par les deux modèles. Finalement, nous supposons que le matériau est isotrope ce qui permet de se contenter d'une modélisation scalaire.

### 2.2. Prise en compte de la contrainte mécanique

Les modèles de l'hystérésis quasi-statiques magnétiques introduits ci-dessus fournissent l'évolution du champ d'induction magnétique  $B$  en fonction du champ d'excitation tangentiel de surface  $H$ . Pour introduire la contrainte mécanique  $T$  de façon simple dans notre modélisation, nous nous sommes inspirés de ce qui se fait en ferroélectricité [5] et avons utilisé une loi d'échelle qui associe le produit  $\alpha TB$  à un champ d'excitation magnétique  $H$  équivalent ( $\alpha$  est une constante caractéristique du matériau). Le modèle dans sa version finale donne l'évolution de  $B$  en fonction des deux entrées que sont  $H$  et  $T$ :  $B(H+\alpha TB)$ . Ce modèle est implicite, un grand nombre de discrétisation spatiale est nécessaire pour assurer sa convergence.

## 3. MODELISATION DE L'ENVELOPPE BARKHAUSEN

Nous venons d'introduire un modèle précis pour l'évolution de l'hystérésis magnétique. Nous avons également proposé une méthode pour remonter à un cycle d'hystérésis  $MBN_{energy}(H)$  à partir de la mesure expérimentale du bruit magnétique de Barkhausen. Nous proposons maintenant d'utiliser un processus inverse qui, à partir de la modélisation, permet de remonter à l'enveloppe du bruit Barkhausen. Pour un matériau donné, si l'on connaît le rapport de normalisation qui permet de comparer les cycles classiques et les cycles Barkhausen, nous pouvons l'utiliser pour diviser les résultats de simulation et remonter à des niveaux d'amplitudes proches de ceux issus de la mesure Barkhausen. Nous dérivons temporellement le résultat obtenu et élevons le résultat à la puissance 0.5. La Figure 2 est une illustration de l'enveloppe du bruit de Barkhausen obtenue en simulation sur une tôle de fer silicium et pour différent niveau de contrainte mécanique.

## 4. 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. Notons juste que le capteur Barkhausen provient de la tête de lecture d'un lecteur de disquette 3 pouce 1/2. Sa taille réduite assure une mesure très locale du bruit de Barkhausen.

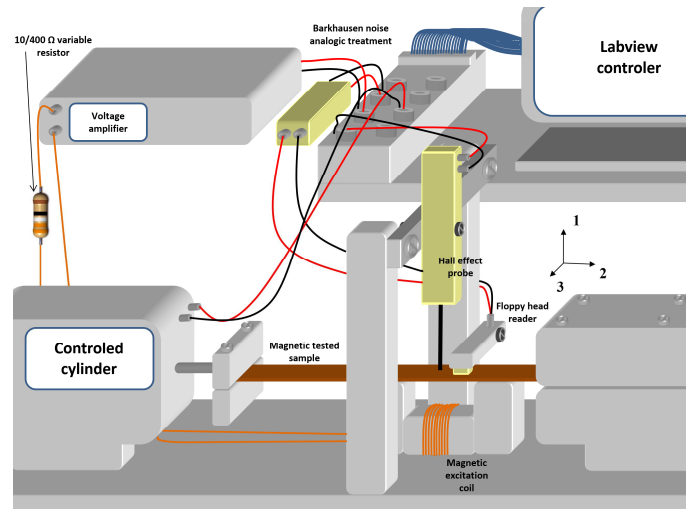


Fig. 1. Banc de caractérisation dédié.

La figure 2 présente l'évolution du bruit de Barkhausen simulée à partir de la modélisation locale de l'hystérésis magnétique et des résultats expérimentaux obtenus à l'aide du banc de caractérisation défini précédemment.

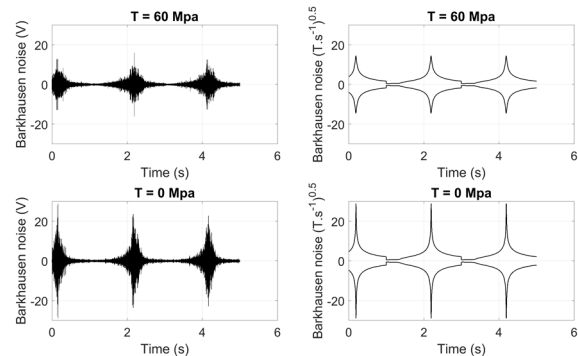


Fig. 2. Comparaisons mesures (gauche) / simulations (droite) pour l'évolution du bruit de Barkhausen avec et sans contrainte mécanique uni-axiale.

Comme nous pouvons le voir figure 2, les bons résultats de simulation devraient nous permettre d'anticiper la distribution des contraintes résiduelles locales à partir des résultats couplés de modélisation et de caractérisation.

## 5. REFERENCES

- [1] 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.
- [2] F. Preisach, "Über die magnetische Nachwirkung". Zeitschrift für Physik, 94: 277-302, 1935.
- [3] D.C. Jiles, D.L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis". J. App. Pjys. 55, pp. 2115, 1984.
- [4] 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.
- [5] B. Ducharme, B. Zhang, D. Guyomar, G. Sebald, "Fractional derivative operators for modeling piezoceramic polarization behaviors under dynamic mechanical stress excitation", Sensors and Actuators A-Physical, Vol. 189, pp. 74-79, 2013.

