



**HAL**  
open science

# Etude des effets de flexion sur les propriétés magnétiques des aciers électriques à l'aide de la méthode pointes magnétiques

Yves Armand Tene Deffo, Benjamin Ducharne, Pierre Tsafack

## ► To cite this version:

Yves Armand Tene Deffo, Benjamin Ducharne, Pierre Tsafack. Etude des effets de flexion sur les propriétés magnétiques des aciers électriques à l'aide de la méthode pointes magnétiques. Symposium de Génie Electrique ( SGE ), Jul 2021, Nantes, France. hal-03289742

**HAL Id: hal-03289742**

**<https://hal.science/hal-03289742v1>**

Submitted on 18 Jul 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Etude des effet de flexion sur les propriétés magnétiques des aciers électriques à l'aide de la méthode pointes magnétiques

Yves Armand Tene Deffo<sup>1</sup>, Pierre Tsafack<sup>1</sup>, Benjamin Ducharne<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Buea, Faculté d'ingénierie et de technologie  
Buea, CAMEROUN

<sup>2</sup>Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité – INSA de Lyon  
Bât. Gustave FERRIE, 8 rue de la physique, 69621 Villeurbanne cedex, France

**RESUME** - Chaque matériau ferromagnétique change de propriété magnétique lorsqu'il est soumis à des contraintes mécaniques. La compréhension des contraintes induites dans les tôles d'acier structurales et électriques par les charges de flexion a longtemps été une priorité scientifique pour la performance fonctionnelle des composants et le recul de la fatigue dans le processus de flexion des tôles. Cependant, une totale compréhension de ses impacts sur la performance des matériaux, en raison des changements relatifs aux propriétés magnétiques du matériau demeure inexploré dans le domaine du contrôle non destructif (CND). L'incapacité de la plupart des méthodes magnétiques de CND à dissocier très clairement les contributions de stress (stress tendu et stress compressif) sur des surfaces opposées du matériel traité est l'une des raisons. Cet article étudie les effets de contrainte de flexion sur les bandes d'acier structurales soumises à différentes contraintes de flexion générant différents angles de flexion. Le changement des propriétés magnétiques le long de l'arc de flexion de chaque bande d'échantillon illustre le stress résiduel de flexion de surface. La méthode pointes magnétiques permet une claire distinction entre l'état de surface extérieure (stress tendu) et l'état de surface intérieure (stress compressif) grâce à ses mesures locales du champ  $B$  à travers la demi-section de la tôle instrumentée.

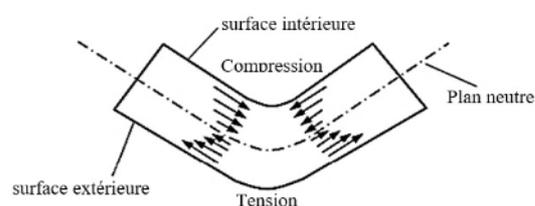
**Mots-clés**— hystérésis magnétique, flexion de stress résiduel, pointes magnétiques.

## 1. INTRODUCTION

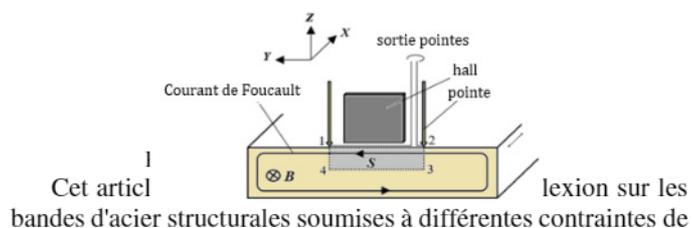
Le pliage est le processus de formation de tôle le plus commun, grâce à ses nombreuses applications dans les industries de tôlerie [1]. Ce processus vise à modifier la géométrie du composant en appliquant des contraintes au-delà de la résistance du rendement du matériau, provoquant la déformation plastique du matériau sans céder; une force est appliquée sur un morceau de tôle provoquant la flexion de celui-ci à un angle et formant la forme désirée [2]. Les contraintes majeures induites pendant les processus de flexion sont des contraintes normales de tension et de compression [3] (Figure. 1).

Les méthodes CND sont largement utilisées dans la caractérisation et le contrôle des composants d'ingénierie contre la dégradation précoce des matériaux. Les techniques de contrôle de surface les plus en vue d'aujourd'hui émane de la mutualité entre les microstructures magnétiques et mécaniques, et sont appelées méthodes micro magnétiques CND. Quelques

exemples sont ; la méthode des courants de Foucault (ECT) [4], la perméabilité incrémentale (MIP) [5][6], et le bruit de Barkhausen (MBN) [7][10].



Bien que limitée aux détections à proximité de la surface, la mise en œuvre de méthodes magnétiques CND pour contrôler les états mécaniques et métallurgiques des aciers de haute performance attire de plus en plus l'attention des fabricants d'acier et des opérateurs [11][12]. Cependant, les rapports de leurs limitations pour localiser précisément les défauts microstructuraux potentiels, la dislocation ou le stress micro résiduel, influencés par la conception du capteur et l'orientation sur la sensibilité au stress directionnel sont bien connus. La méthode pointes magnétiques à elle seul circonviert à plusieurs de ses limites [13]. Sa mise en œuvre, longtemps retardée par les limitations technologiques dans la manipulation de signaux très faibles (1mV) sous champ quasi statique, dans le CND micro-magnétique le rend désormais approprié pour divers contrôles [12]. Cette méthode fait l'équivalent d'une demi-bobine d'un tour formé par une paire de pointes en contact électrique avec la surface du matériau de teste [14]. L'atout supplémentaire de cette méthode réside dans sa capacité à mesurer localement le champ  $B$  à travers la demi-section ( $S$ ) de la tôle instrumentée (Figure 2).



flexion générant différents angles de flexion. Des mesures magnétiques locales ont été effectuées à l'aide de la méthode pointes magnétiques. Le changement des propriétés magnétiques le long de l'arc de flexion de chaque bande d'échantillon illustre le stress résiduel de flexion de surface.

## 2. VALIDATION EXPERIMENTALE

La Figure 3 présente cinq d'échantillon de dimensions égales (120 x 30 x 0,5) mm extraits d'une feuille d'acier à faible carbone. Quatre de ces tôles ont été réglées sous l'effort de flexion par l'intermédiaire d'une machine à flexion en V à commande manuelle pour former des angles de flexion de 120°, 145°, 151° et 163° à leurs centres respectivement, la cinquième bande agissant comme bande de référence (non stressée) à 180°.

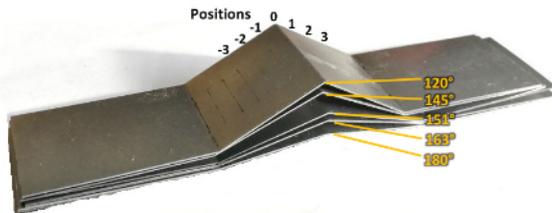


Fig. 3. Illustration pour l'hypothèse du modèle.

Les mesures du champ  $H$  et du champ  $B$  le long du plan incliné ont été ajustées en fonction des angles de flexion de la bande d'échantillon, ceci pour de maintenir un alignement perpendiculaire entre les champs et les capteurs.

## 3. RESULTATS ET DISCUSSION

La méthode pointes magnétiques a été utilisée pour la mesure locale des propriétés magnétiques. Des mesures dans le sens de la longueur des échantillons traités ont été effectuées à 4 mm d'intervalles aux lignes d'échantillonnage (positions) qui enjambent la zone symétrique sur les bandes. Les mesures sur les surfaces extérieures et intérieures ont été comparées en termes de perméabilité relative et de coercivité. Les résultats sont représentés à la figure 4.

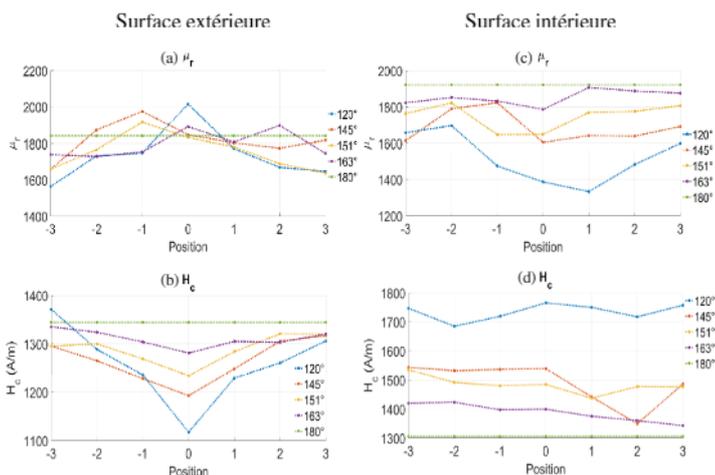


Fig. 4. Mesures de la perméabilité relative et de coercivité sur les surfaces extérieures et intérieures des bandes d'échantillon

Le stress résiduel induit le long de l'axe de flexion modifie à la fois les propriétés mécaniques et magnétiques des échantillons traités. L'action de flexion entraîne à la fois la tension et la compression dans la tôle. D'une part, le stress compressif induit définit une région de déformation qui favorise la dislocation et la résiliation des grains qui conduit à une fort dégradation de la perméabilité relative et de la coercivité à la surface intérieure

(Figure 4.c, d). Cela provoque un alignement aléatoire des centres d'épingleage de la paroi du domaine et tend à dériver les moments magnétiques de l'axe d'aimantation provoquant une aimantation aléatoire des grains en raison des désalignements et des distorsions. D'autre part, le stress résiduel de tension tend à aligner les grains d'une manière réparatrice le long de l'axe de magnétisation. Ceci soulagent davantage l'aimantation aléatoire des grains et la distorsion, donc limitant l'effet de démagnétisation à la surface extérieure (Figure 4.a, b).

Par conséquent, la méthode pointes magnétiques permet une claire distinction entre l'état de surface extérieure (stress tendu) et l'état de surface intérieure (stress compressif) relative aux champ  $B$  mesuré sur ces surfaces respectives. Les contraintes tendues et les contraintes compressives diminuent vers le centre de la feuille au plan neutre. Dans la version étendue de cet article, une méthode expérimentale/numérique mixte basée sur la signature magnétique locale est proposée pour évaluer les gradients de stress résiduels mécaniques et contrôler indirectement la viabilité du processus de durcissement par effet de flexion.

## 4. REFERENCES

- [1] N. Gwangwava et al, «Design of a dual operating mode sheet folding machine.» *Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res.*, vol. 2, n° 14, pp. 90-101, October 2013.
- [2] A. E. E. Manar, «Design, Manufacture and Simulate a Hydraulic Bending Press.» *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 2, n° 11, pp. 1-9, ISSN: 2278-0149, 2013.
- [3] A. Pulnikov, Modification of Magnetic Properties of Non Oriented Electrical Steels by the Production of Electromagnetic Devices, Belgie: Ghent University, 2004.
- [4] M. Uesaka, T. Nakanishi, K. Miya, H. Komatsu, K. Aoki et K. Kasai, «Micro eddy current testing by micro magnetic sensor array.» *IEEE Trans. on Mag.*, vol. 31, n° 11, pp. 870-876, 1995.
- [5] B. Gupta, B. Ducharme, T. Uchimoto, G. Sebald, T. Miyazaki et T. Takagi, «Physical Interpretation of the Microstructure for aged 12 Cr-Mo-V-W Steel Creep Test Samples based on Simulation of Magnetic Incremental Permeability.» *J. of Mag. and Mag. Mat.*, vol. 486, 2019.
- [6] B. Gupta, T. Uchimoto, B. Ducharme, G. Sebald, T. Miyazaki et T. Takagi, «Magnetic incremental permeability non-destructive evaluation of 12 Cr-Mo-W-V Steel creep test samples with varied ageing levels and thermal treatments.» *NDT & E Int.*, vol. 104, pp. 12, 2019.
- [7] P. Zerovnik, J. Grum et G. Zerovnik, «Determination of hardness and residual-stress variations in hardened surface layers with magnetic Barkhausen noise.» *IEEE Trans. on Mag.*, vol. 46, n° 13, pp. 899-904, 2010.
- [8] J. Gualandri, M. Ourak, S. Desvaux et M. Duquennoy, «The evaluation of surface residual stress in aeronautic bearings using the Barkhausen noise.» vol. 37, n° 11, pp. 9-17, 2004.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] G. Dobmann, «Physical basics and industrial application of 3MA micromagnetic multiparameter microstructure and stress analysis.» chez *12th Int. Workshop on Electromagnet NDE (ENDE 2007)*, Cardiff, UK, 2007.
- [12] Y. Gabi et B. Wolter, «Inline integration of electromagnetic NDT methods.» chez *15th International Workshop 1&2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing.*, Grenoble, Sept. 2019.
- [13] E. Werner, «Einrichtung zur Messung magnetischer Eigenschaften von Blechen bei Wechselstrom magnetisierung (The device for testing of electrical steel magnetized by AC field)». Australia Brevet 191 015, 1957.
- [14] T. Yamaguchi, K. Senda, M. Ishida et al, «Theoretical analysis of localized magnetic flux measurement by needle probe.» *J. Physique IV*, vol. 8, p. 717-20 Pr2, 1998.