

Développement d'une nouvelle méthode de mesure magnétique anhystérétique 2D « en spirale »

Robin ADAM^{1,2}, Floran MARTIN³, Mathieu DOMENJOU^{1,2}, Laurent DANIEL^{1,2}

¹ Université 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

³ Department of Electrical Engineering, Aalto University Maarintie 8, FI-02150 Espoo

Les tôles de Fer-Silicium sont utilisées pour fabriquer des transformateurs et moteurs électriques. Le comportement magnétique de ces matériaux est généralement pris en compte sur la base de leurs propriétés anhystérétiques. Plusieurs méthodes de mesure anhystérétique existent dans la littérature. Cette étude en présente une nouvelle dite « en spirale » permettant d'effectuer des mesures en deux dimensions. L'objectif de cette étude est de montrer la pertinence de cette nouvelle méthode, mais aussi d'en relever les perspectives d'amélioration.

Mots-clés – Excitation 2D - Mesure 2D - Magnétisme - Induction - Anisotropie - Courbe anhystérétique

1. INTRODUCTION

La particularité d'une courbe anhystérétique, parfois appelée « courbe idéale » [1], est de mettre en évidence les propriétés magnétiques réversibles d'un matériau [1] [2] [3]. La courbe anhystérétique est facilement implémentable dans les algorithmes et logiciels de simulation [4] [5] et est souvent utilisée pour décrire le comportement des matériaux ferromagnétiques [6] [7] [8], dont les applications sont les moteurs et transformateurs électriques [9].

Une approche pour étudier les propriétés anhystérétiques des matériaux est d'utiliser des matériaux présentant un hystérésis faible et donc de le négliger [10]. Cependant, cela restreint le type de matériau à utiliser et introduit une erreur de mesure supplémentaire. Une autre approche est d'utiliser une méthode de mesure anhystérétique [2] [11] [12] [13] [14]. Trois principales méthodes de mesure existent dans la littérature pour déterminer l'état anhystérétique correspondant à un champ magnétique noté $\vec{H}_{ahn}$:

- Méthode magnétique uniaxiale [2] [11] [12] [13] [14]. Cette méthode consiste à soumettre le matériau au champ magnétique $\vec{H}_{ahn}$ superposé à un champ oscillant d'amplitude décroissante.
- Méthode thermique [14]. Cette méthode consiste à désaimanter le matériau en le chauffant au dessus de sa température de Curie. Ensuite, le matériau est lentement refroidi tout en étant soumis au champ d'excitation magnétique $\vec{H}_{ahn}$.
- Méthode récente d'extraction de la courbe anhystérétique [15] à partir d'une courbe expérimentale avec hystérésis et de la courbe de première aimantation.

Ces méthodes sont uniaxiales : la direction du champ magnétique est fixe tout au long de la procédure. Nous avons donc envisagé dans ce travail de mettre au point une méthode de mesure anhystérétique 2D pour caractériser le comportement magnétique. Cet article présente dans un premier temps le dispositif et le protocole expérimental utilisé, en détaillant la manière d'obtenir une courbe anhystérétique. Les résultats et les perspectives d'amélioration du dispositif sont ensuite analysés.

2. MÉTHODE ET SYSTÈME DE CARACTÉRISATION MAGNÉTIQUE

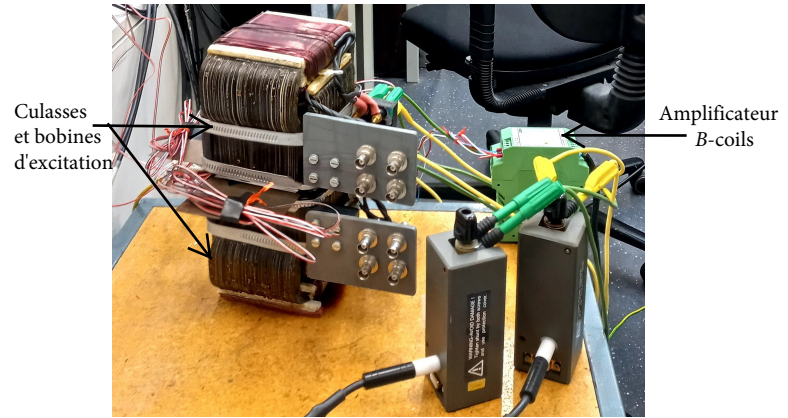


FIG. 1. Dispositif expérimental.

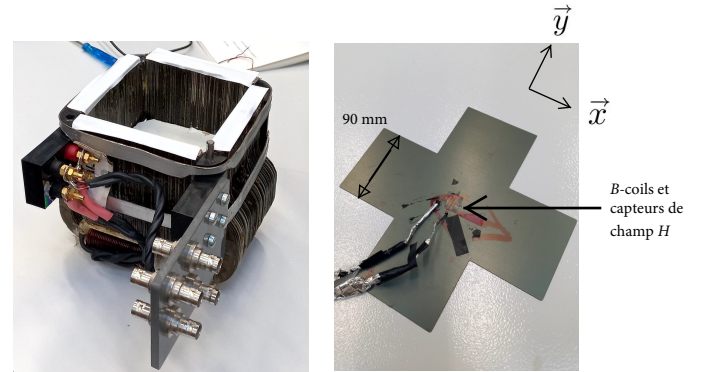


FIG. 2. Système d'excitation magnétique 2D.

FIG. 3. Échantillon et système de mesure 2D.

Les mesures ont été réalisées avec un dispositif d'excitation magnétique constitué de culasses et de bobines, visible en Figure 1 et en Figure 2. Deux amplificateurs de modèle AE Techron 7548 pour la tension d'excitation sont utilisés, ainsi qu'un amplificateur de signal pour les B-coils (Figure 1). L'ensemble est contrôlé grâce au logiciel Labview, avec une fréquence d'échantillonnage de 50 kHz. L'échantillon utilisé est une croix à quatre branches de dimensions 240 mm × 240 mm × 0.5 mm, découpée dans des tôles de Fer-Silicium M400-50A à grains non orientés. Cet échantillon est présenté en Figure 3.

La mesure 2D du champ d'excitation magnétique est effectuée par des capteurs de magnéto-résistance à effet tunnel. Ces

capteurs ont pour avantage de pouvoir mesurer des valeurs de champ constantes avec une très bonne sensibilité. La mesure du champ d'induction est effectuée également en 2D par deux bobinages secondaires appelés B -coils. Les deux bobines sont enroulées au centre de l'échantillon en passant chacune par deux trous : les segments reliant chaque paire de trous sont parallèles aux deux directions principales. Celles-ci sont appelées :

- Direction de laminage ou « rolling ». Une des branches de l'échantillon a été découpée parallèlement à cette direction. Pour la suite de l'étude, cette direction sera celle de l'axe Ox (Figure 3).
- Direction transverse, perpendiculaire à celle de laminage. Cette direction sera celle de l'axe Oy (Figure 3).

Les champs magnétiques d'excitation et d'induction sont définis respectivement par les vecteurs $\vec{H}$ et $\vec{B}$. On note H_x et H_y ainsi que B_x et B_y leurs composantes selon les axes Ox et Oy directement mesurées par les capteurs de champ et les B -coils.

On introduit les vecteurs unitaires $\vec{u}_{//}$ et $\vec{u}_{\perp}$ définis à partir du champ d'excitation magnétique $\vec{H}$:

$$\vec{u}_{//} = \frac{\vec{H}}{\|\vec{H}\|} ; \quad \vec{u}_{\perp} = \vec{z} \wedge \vec{u}_{//} \quad (1)$$

Le champ d'induction $\vec{B}$ peut alors être séparé en deux composantes respectivement parallèles et perpendiculaires au champ $\vec{H}$:

$$\vec{B} = B_{//} \vec{u}_{//} + B_{\perp} \vec{u}_{\perp} \quad (2)$$

Pour obtenir un point de la courbe anhystérétique avec cette nouvelle méthode, la première étape est une désaimantation en 2D de l'échantillon, pour s'assurer de partir d'un point d'induction nulle. On note U_x la tension d'excitation des bobines orientées selon l'axe Ox et U_y la tension de celles orientées selon l'axe Oy (Figure 1, 2 et 3). Les composantes U_x et U_y sont contrôlées de manière à appliquer un champ cyclique et décroissant en norme selon les deux équations suivantes, avec t le temps, f la fréquence de la désaimantation, U_{max} une tension suffisamment élevée pour approcher la saturation du matériau et τ une constante de temps :

$$U_x(t) = U_{max} \cos(2\pi ft) e^{-t/\tau} \quad (3)$$

$$U_y(t) = U_{max} \sin(2\pi ft) e^{-t/\tau} \quad (4)$$

La désaimantation est effectuée à une fréquence notée f de 100 Hz avec 2500 cycles.

La deuxième étape est l'envoi d'une commande en tension appelée « step ». Ce signal est constant au cours du temps et permet d'atteindre le champ d'induction souhaité. On introduit le paramètre θ , défini comme la répartition du signal de tension d'excitation entre U_x et U_y . Les deux équations de la commande de tension de « step » pour une valeur de θ sont les suivantes, avec U_{step} l'amplitude de la commande :

$$U_{x, step} = U_{step} \cos(\theta) \quad (5)$$

$$U_{y, step} = U_{step} \sin(\theta) \quad (6)$$

Comme les bobines sont contrôlées en tension, θ correspond aussi à l'angle entre le champ $\vec{B}$ et l'axe Ox .

Sur la Figure 4, le passage de l'état désaimanté au signal de « step » est représenté en bleu : $U_{x, step} = 4.0$ V et $U_{y, step} = 5.2$ V dans cet exemple. Cependant, l'effet d'hystérésis conduit à un champ d'excitation correspondant différent de celui du point de la courbe anhystérétique à atteindre. Pour retrouver l'état anhystérétique, une désaimantation en 2D est effectuée autour de la valeur d'induction à atteindre. Les composantes U_x et U_y sont

contrôlées de manière à appliquer la même désaimantation présentée en (3) et (4) additionnée à l'excitation « step ». Les équations de cette commande sont données ci-dessous en (7) et (8) :

$$U_x(t) = U_{x, step} + U_{max} \cos(2\pi ft) e^{-t/\tau} \quad (7)$$

$$U_y(t) = U_{y, step} + U_{max} \sin(2\pi ft) e^{-t/\tau} \quad (8)$$

Cette excitation particulière donne à U_x et U_y une forme de spirale, en gris sur la Figure 4 ($U_{max} \approx 15$ V et τ , f et durée beaucoup plus faibles que dans la réalité pour faciliter la visualisation). Les mesures ont été effectuées pour 18 valeurs d'angle θ , de 0 à 180 ° tous les 10 ° afin d'obtenir un demi-cadran 2D.

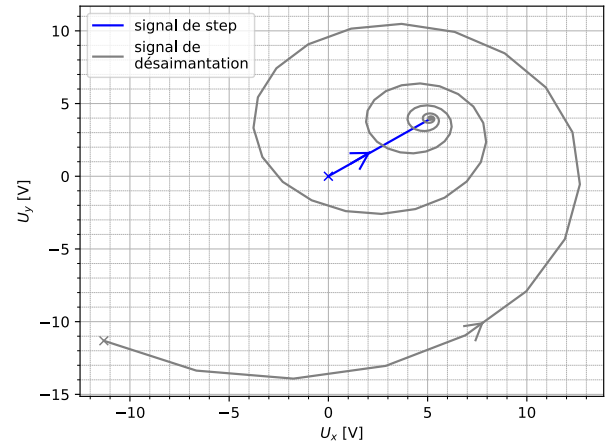


FIG. 4. Courbe $U_y = f(U_x)$ schématique de la méthode en spirale pour atteindre un point de courbe anhystérétique.

3. RÉSULTATS ET PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION

3.1. Les mesures anhystérétiques réalisées

Les résultats de l'étude sont présentés sur les Figures 5, 6, 7 et 8. Les Figures 5 et 6 présentent respectivement l'évolution de l'induction magnétique en fonction de l'excitation magnétique dans la direction de laminage (Ox) et dans la direction transverse (Oy) pour plusieurs valeurs d'excitation. Ici, la courbe anhystérétique est bien comprise à l'intérieur du cycle majeur pour les deux directions, à l'exception du point d'induction de 1.65 T pour la direction de laminage et du point de 1.45 T pour la direction transverse. Cela permet de valider la méthode pour ces deux directions principales, mais avec une erreur de mesure non négligeable proche de la saturation.

La Figure 7 présente l'évolution de la composante B_y de l'induction magnétique en fonction de la composante B_x . La valeur de tension « step » notée U_{step} a été fixée à 5 V et l'angle d'excitation varie de 0 à 180 ° tous les 10 °. Malgré l'erreur de mesure significative, cette courbe montre la symétrie du champ d'induction $\vec{B}$ selon l'axe Oy entre les angles d'excitation de 0 à 90 ° et ceux de 90 à 180 °. Cela permet de s'assurer que le signal d'entrée en tension permet bien de contrôler l'amplitude du champ d'induction.

La Figure 8 présente l'évolution de la composante d'induction $B_{//}$ exprimée en (1) et de la composante $B_{\perp}$ exprimée en (2) en fonction de la norme du champ $\vec{H}$ pour quatre valeurs d'angle θ . La courbe de la composante d'induction parallèle au champ $\vec{H}$ présente une haute perméabilité magnétique à bas champ, un coude de saturation et une valeur stagnante à haut champ. Dans la direction de laminage, la Figure 5 indique une saturation autour de 1,6 T ce qui correspond à la saturation

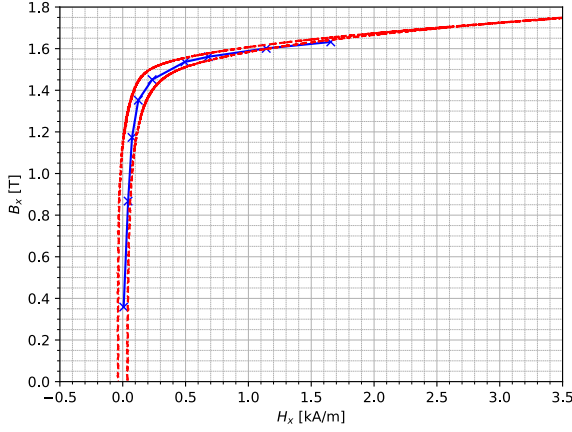


FIG. 5. Induction magnétique B_x en fonction de l'excitation H_x dans la direction de laminage ($\theta = 0^\circ$) : courbe anhystérétique (bleu) et cycle majeur (rouge).

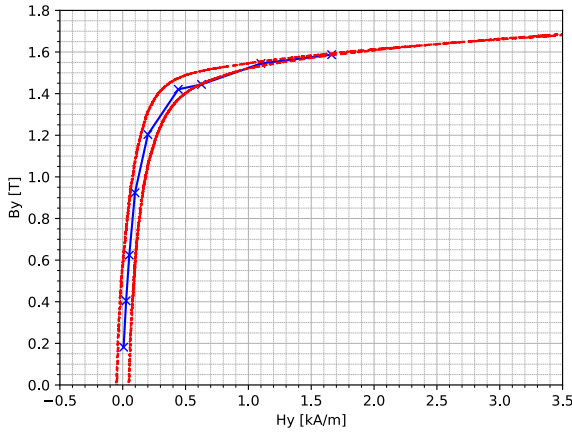


FIG. 6. Induction magnétique B_y en fonction de l'excitation H_y dans la direction transverse ($\theta = 90^\circ$) : courbe anhystérétique (bleu) et cycle majeur (rouge).

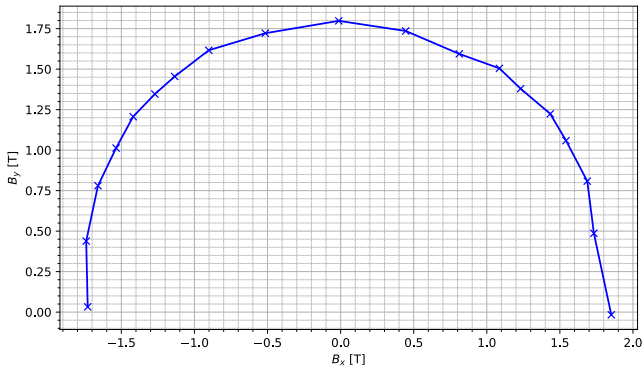


FIG. 7. Induction magnétique : composante selon la direction transverse B_y en fonction de la composante selon la direction de laminage B_x pour une valeur de tension « step » fixée à $U_{\text{step}} = 5$ V et pour plusieurs valeurs d'angle θ .

du Fer-Silicium. Cette valeur est retrouvée en Figure 8, à l'imprécision de mesure près. La valeur de saturation est atteinte à

des valeurs d'excitation plus élevée pour les angles de 30° et 60° que pour les directions principales. Cela atteste que les directions principales du matériau sont des directions privilégiées d'aimantation. Cependant, la composante $B_\perp$ n'est pas négligeable. La composante du champ d'induction magnétique perpendiculaire au champ d'excitation rend compte de la différence angulaire entre les deux champs. Dans un milieu parfaitement isotrope, celle-ci devrait être nulle. La Figure 9 présente l'évolution de l'orientation du champ magnétique $\vec{H}$ en fonction de sa norme pour quatre valeurs d'angle θ . À $\theta = 0^\circ$ l'angle du champ $\vec{H}$ tend bien vers θ aux points d'amplitude d'excitation maximale correspondant à la saturation du matériau. Ce n'est pas le cas pour les autres angles, où l'angle de $\vec{H}$ semble tendre vers une valeur inférieure à θ , ce qui est cohérent avec la composante $B_\perp$ non négligeable à saturation sur la Figure 8 pour ces valeurs de θ .

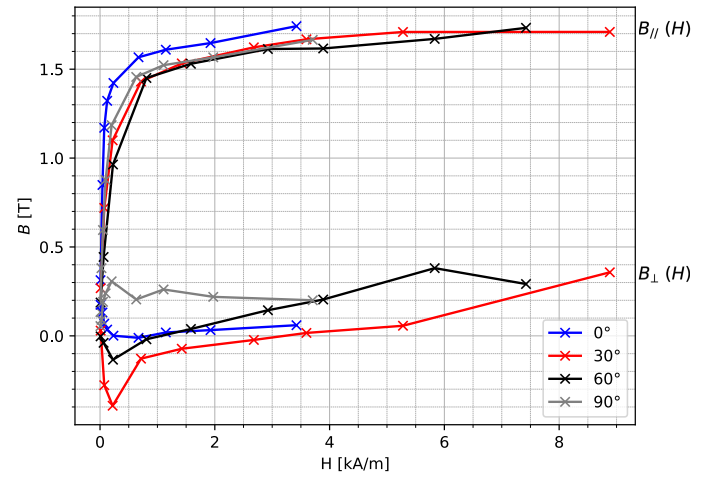


FIG. 8. Induction magnétique : composante parallèle $B_{//}$ et perpendiculaire $B_\perp$ au champ d'excitation magnétique en fonction de la norme H pour plusieurs valeurs d'angle θ .

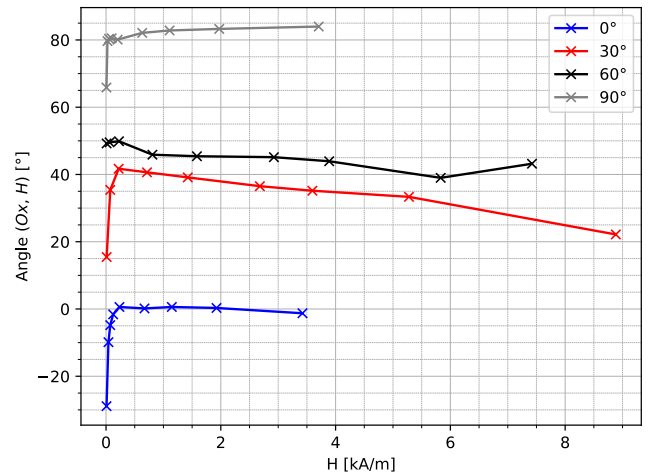


FIG. 9. Angle du champ d'excitation magnétique par rapport à l'axe Ox en fonction de sa norme H pour plusieurs valeurs d'angle θ .

3.2. Discussion

La mise en évidence de directions privilégiées d'aimantation et donc d'anisotropie montre la pertinence de la méthode. Celle-ci peut être confrontée aux méthodes de mesures uniaxiales existantes [14], dont certaines mettent bien en évidence l'anisotropie [16]. De plus, il est important de réaliser des méthodes de mesure « directes » [14] de la courbe anhystérétique pour les comparer aux méthodes de mesures « indirectes » [10] [15]. Cela permet de s'assurer que les modèles décrivant l'effet d'hystérésis magnétique [13] modélisent correctement la partie anhystérétique.

Ici, la composante observée est en partie due à l'anisotropie dans le matériau. En effet, le fait que la composante $B_{\perp}$ de la Figure 8 soit négative en dessous de 3 kA/m à 30 ° et en dessous de 1 kA/m à 60 ° montre un décalage angulaire du champ d'induction par rapport au champ d'excitation. Ce décalage se retrouve sur la Figure 9, et semble favoriser l'aimantation dans la direction de laminage. Cette direction est donc privilégiée par rapport à la direction transverse. À haut champ cette composante devrait tendre vers 0 quel que soit l'angle θ , et l'angle de $\vec{H}$ devrait tendre vers θ . Il y a donc une erreur de mesure angulaire. Cette erreur est la combinaison d'effets dynamiques parasites et d'une erreur d'alignement des capteurs de champ d'excitation entre eux et par rapport aux capteurs d'induction. L'erreur d'alignement entre les deux capteurs d'induction est négligeable, car le champ d'induction en fonction de l'angle est bien symétrique en Figure 7. Enfin, l'imprécision de mesure observée est au moins en partie due à la nécessité du perçage de trous dans la zone de mesure pour faire passer les bobines des B-coils.

Plusieurs points peuvent donc être améliorés pour diminuer l'erreur de mesure. Il est possible de limiter l'impact des effets dynamiques parasites en effectuant une moyenne entre un point issu d'une spirale en sens trigonométrique et un autre issu d'une spirale en sens opposé. Il faudrait également corriger le défaut d'alignement entre les capteurs. Pour le caractériser, il serait possible d'utiliser une bobine de Helmutz 2D afin d'obtenir la réponse des capteurs à un champ tournant connu. Il serait aussi possible de trouver le repère propre aux capteurs de champ $\vec{H}$. Ainsi, une matrice de passage de ce repère vers celui des capteurs d'induction pourrait être construite. Enfin, pour diminuer l'erreur et l'imprécision des mesures d'induction magnétique, il serait pertinent de passer à la méthode de mesure des B-pointes [17] à la place de celle des B-coils. Cette méthode de mesure permet de mesurer le flux magnétique directement sur la surface du matériau, en plaçant les pointes sur deux points de contact par direction. Cela permettrait notamment de s'affranchir du perçage de trous. Cependant, il faut pouvoir gérer l'acquisition d'un signal beaucoup plus faible. Enfin, il conviendrait d'obtenir des points de mesure avec une induction plus élevée, afin de tendre davantage vers la saturation magnétique.

4. CONCLUSIONS

Les résultats de cette étude illustrent la mise en oeuvre d'une méthode originale d'obtention de courbe anhystérétique en 2D. Cette nouvelle méthode s'inscrit dans la caractérisation magnétique bidirectionnelle [18]. Le caractère anhystérétique ouvre la voie à des implémentations rapides de propriétés magnétiques complexes en 2D sur des logiciels de simulation.

La méthode présentée ici a montré sa pertinence en étant en accord avec les mesures d'hystérésis magnétique effectuées et en mettant en évidence des propriétés complexes d'un matériau ferromagnétique. Elle est donc à approfondir et à confronter aux méthodes anhystérétiques uniaxiales existantes.

5. RÉFÉRENCES

- [1] W. Steinhaus et E. Gumlich, « Ideal or hysteresis-free magnetization », *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, vol. 17, p. 369–384, 1915.
- [2] R. M. Bozorth, « Ferromagnetism », New York, U. S. : IEEE Press, 1951.
- [3] C. D. Mee, « THE PHYSICS OF MAGNETIC RECORDING », *Selected Topics in Solid State Physics*, Amsterdam : North-Holland, 1964.
- [4] N. Pop et O. Caltun, « Jiles-Atherton Magnetic Hysteresis Parameters Identification », *Acta Physica Polonica A*, vol. 120, p. 491–496, sept. 2011.
- [5] M. Toman, G. Stumberger, et D. Dolinar, « Parameter Identification of the Jiles-Atherton Hysteresis Model Using Differential Evolution », *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, p. 1098–1101, juin 2008.
- [6] D. C. Jiles, « Introduction to Magnetism and Magnetic Materials », London : Chapman and Hall, 1991.
- [7] D. C. Jiles et D. L. Atherton, « Theory of the magnetisation process in ferromagnets and its application to the magnetomechanical effect », *Journal of Physics D : Applied Physics*, vol. 17, p. 1265–1281, juin 1984.
- [8] L. Daniel, O. Hubert, N. Buiro, et R. Billardon, « Reversible magneto-elastic behavior : A multiscale approach », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 56, p. 1018–1042, mars 2008.
- [9] S. Cundeva, « A transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis », *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 5, p. 21–30, janv. 2008.
- [10] R. Szweczyk, « Validation of the Anhyseretic Magnetization Model for Soft Magnetic Materials with Perpendicular Anisotropy », *Materials*, vol. 7, p. 5109–5116, juil. 2014.
- [11] U. Aydin, P. Rasilo, D. Singh, A. Lehtikoinen, A. Belahcen, et A. Arkio, « Coupled Magneto-Mechanical Analysis of Iron Sheets Under Biaxial Stress », *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 3, p. 1–4, 2016.
- [12] C. Gourdin, L. Hirsinger, G. Barbier, et R. Billardon, « Experimental identification of the coupling between the anhyseretic magnetic and magnetostrictive behaviours », *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 177–181, p. 201–202, janv. 1998.
- [13] D. C. Jiles et D. L. Atherton, « Theory of ferromagnetic hysteresis », *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 61, p. 48–60, sept. 1986.
- [14] J. Pearson, P. T. Squire, et D. Atkinson, « Which anhyseretic magnetization curve », vol. 33, no. 5, p. 3970–3972, 1997.
- [15] M. Nowicki, « Anhyseretic Magnetization Measurement Methods for Soft Magnetic Materials », *Materials*, vol. 11, p. 2021, oct. 2018.
- [16] O. Hubert, L. Daniel, et R. Billardon, « Experimental analysis of the magnetoelastic anisotropy of a non-oriented silicon iron alloy », *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 254–255, p. 352–354, janv. 2003.
- [17] P. Fagan, A. Abderahmane, M. Domenjoud, et L. Daniel, « Magnetic Hysteresis Cycle Measurements With a New Needle Probe Setup », *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 74, no. 6000511, 2025.
- [18] C. Appino, N. Banu, C. Delaunay, F. Sixdenier, C. Joubert, C. Ragusa, S. Huang, L. Solimene, et O. de La Barrière, « Interlaboratory comparison of two-dimensional magnetic measurements », in *Soft Magnetic Materials Conference*, (Prague), sept. 2023.