

Mesures de cycle d'hystérésis magnétique avec un montage B-pointes

Patrick Fagan, Abdellahi Abderahmane, Mathieu Domenjoud, Laurent Daniel

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

²Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Génie Électrique et Électronique de Paris, 75255 Paris

RESUME – Cette étude détaille le développement d'une nouvelle méthode de mesure B-pointes. Plusieurs montages B-pointes sont présentés, et leurs forces et faiblesses sont analysées. Une configuration originale, aux performances optimisées, est proposée. Les sources d'erreur sur la mesure B-pointes sont quantifiées, et des pistes pour les minimiser sont proposées. La validité de la méthode est estimée en la comparant avec les autres méthodes de mesures B-pointes, en prenant comme référence une mesure B-coil dans le cas d'une mesure unidirectionnelle. Les résultats, obtenus sans aucune procédure de calibration du montage, attestent de très bons niveaux de précision. Pour finir, un dispositif de mesure de champ 2D est proposé.

Mots-clés – Mesure magnétique, contrôle non destructif, caractérisation expérimentale.

1. INTRODUCTION

Les matériaux ferromagnétiques présentent un cycle d'aimantation $B(H)$ avec hystérésis lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique H variable. L'analyse du cycle $B(H)$ permet de déterminer plusieurs grandeurs fondamentales d'intérêt pour de nombreuses applications industrielles. Parmi celles-ci figurent le champ coercitif, l'aimantation rémanente et les pertes par hystérésis. La mesure par bobine encerclante est une méthode standard de mesure du cycle $B(H)$ en raison de sa simplicité et de son bon rapport signal-sur-bruit [1]. Cependant, cette mesure est sensible seulement à la composante de l'induction perpendiculaire à la section de l'échantillon et elle est une moyenne de la variation de l'induction sur celle-ci. Sur de géométries plus complexes, les bobines encerclantes peuvent être utilisées sur des tôles en perçant des trous [2, 3, 4], mais cela modifie l'état magnétique et mécanique de l'échantillon [5].

La méthode par B-pointes permet de remplacer la bobine encerclante par deux pointes en contact avec la surface conductrice de l'échantillon. Cette méthode est donc équivalente à une mesure avec une bobine d'un demi-tour [6]. Cette méthode requiert uniquement un contact électrique entre les pointes de mesure et l'échantillon, ce qui permet de faire des mesures non-destructives d'induction magnétique sur des tôles, au prix d'un rapport signal-sur-bruit plus défavorable. Un avantage très important de la méthode B-pointes est la possibilité d'utiliser plusieurs paires de pointes, chacune orientée dans une direction spécifique, pour pouvoir mesurer la variation du flux magnétique suivant plusieurs directions [5, 7]. La figure 1 montre le même échantillon équipé d'une bobine encerclante et d'un système B-pointes classique [6] pour la mesure de la variation de flux magnétique dans le même échantillon dont la section est surlignée en vert.

Ce travail, présenté plus en détail dans [7], présente un nouveau montage B-pointes qui donne des mesures plus précises par rapport à d'autres montages de la littérature. Les équations liant les tensions mesurées aux variations d'induction magnétique sont déterminées à partir de l'équation de Maxwell-Faraday. Les mesures effectuées dans le cas unidirectionnel avec le montage proposé sont comparées avec les résultats obtenus par la méthode

utilisant une bobine encerclante (choisie comme méthode de référence).

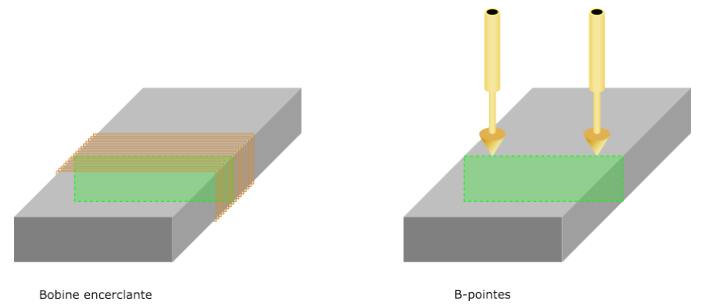


FIG. 1. Comparaison entre le montage avec bobine encerclante et B-pointes pour la mesure de l'induction magnétique sur la même surface normale (en vert).

2. DESCRIPTION DU MONTAGE PROPOSÉ

2.1. Relations intégrales à travers la loi de Maxwell-Faraday

Le montage développé dans ce travail fournit une mesure sensible à d'éventuelles asymétries de flux magnétique tout en étant peu impacté par le flux magnétique dans l'air [7]. Ce dispositif combine les avantages des montages déjà décrits dans la littérature [8, 9]. Un schéma détaillé du montage est montré sur la figure 2.

Ce montage peut être étudié grâce à la loi de Maxwell-Faraday :

$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{n} dS = \frac{d\Phi(S)}{dt} \quad (1)$$

où :

- S est une surface fermée de contour ∂S ;
- $\vec{E}$ est le champ électrique;
- $\vec{B}$ est l'induction magnétique;
- $\vec{n}$ est la normale à la surface S dans le point considéré.

Les contours et les surfaces associés sont définis à la figure 2 :

- 1'144'3'322' : $S_{\text{air b}} + S_{\text{air t}} + S_{\text{sample}}$
- 5'6' : $S_{\text{air t}}$
- 7'8' : $S_{\text{air b}}$

Si on utilise la loi de Maxwell-Faraday dans les trois contours considérés, on obtient :

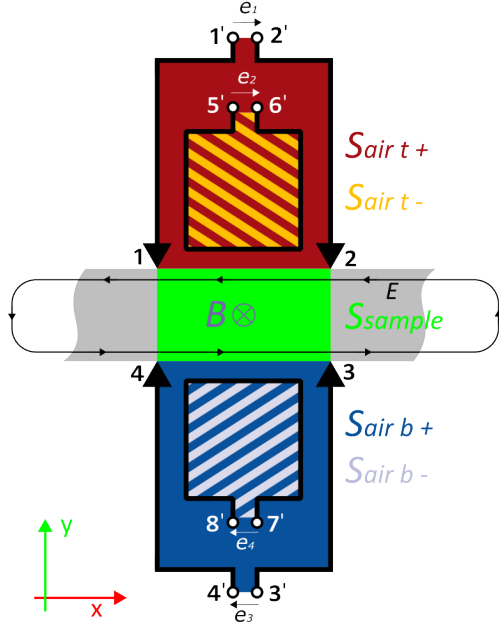


FIG. 2. Montage B-pointes proposé.

$$\begin{cases} e_1 + e_{14} + e_{44'} + e_3 + \\ e_{3'3} + e_{32} + e_{22'} + e_{2'1'} = \Sigma \frac{d\Phi}{dt} \end{cases} \quad (2a)$$

$$\begin{cases} \Sigma \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt}(S_{air\ t+}) - \frac{d\Phi}{dt}(S_{sample}) - \frac{d\Phi}{dt}(S_{air\ b+}) \\ e_2 = -\frac{d\Phi}{dt}(S_{air\ t-}) \end{cases} \quad (2b)$$

$$\begin{cases} e_4 = -\frac{d\Phi}{dt}(S_{air\ b-}) \end{cases} \quad (2c)$$

Deux hypothèses sont nécessaires pour simplifier ces équations :

- il n'y a pas de courant circulant à travers les points, ce qui rend les tensions $e_{11'}$, $e_{22'}$, $e_{33'}$ et $e_{44'}$ nulles ;
- le champ électrique vertical est symétrique par rapport au centre de la surface étudiée S_{sample} , et donc $e_{14} + e_{32} = 0$.

Dans ce cas, la variation de flux magnétique dans la surface S_{sample} est donnée par :

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{dt}(S_{sample}) + \frac{d\Phi}{dt}(S_{air\ b+}) - \frac{d\Phi}{dt}(S_{air\ b-}) + \frac{d\Phi}{dt}(S_{air\ t+}) - \frac{d\Phi}{dt}(S_{air\ t-}) \\ = [e_1 - e_2] + [e_3 - e_4] \end{aligned} \quad (3)$$

Ainsi, les tensions mesurées permettent d'obtenir la variation de flux magnétique dans l'échantillon, ainsi qu'une partie du flux dans l'air qui n'est pas parfaitement compensée.

2.2. Lien entre tensions mesurées et induction magnétique

Le système de mesure, avec les grandeurs géométriques utiles, est montré à la figure 3. Les circuits analogiques qui traitent les tensions mesurées sont supposés être des amplificateurs parfaits (de gain G_i , avec $i \in \{1; 2; 3; 4\}$) :

$$V_i = G_i e_i \Rightarrow e_i = \frac{V_i}{G_i} \quad (4)$$

Si on veut remonter à l'induction magnétique dans l'échantillon et au cycle B(H) du matériau, il faut simplifier le problème

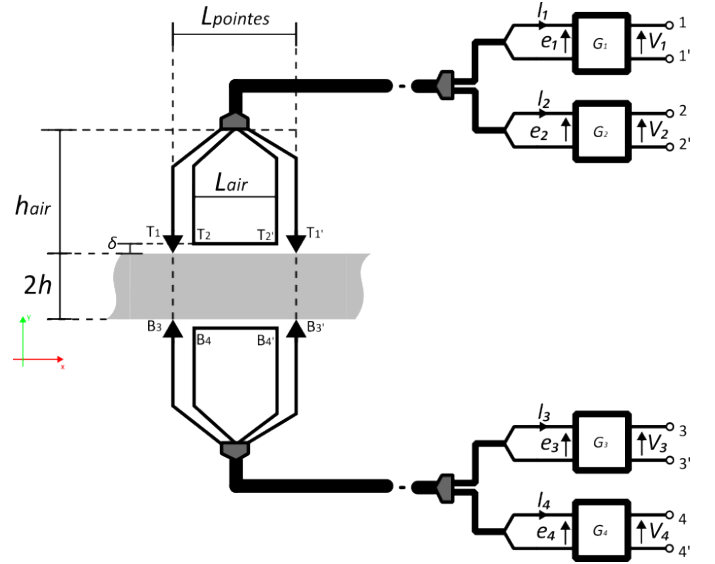


FIG. 3. Représentation du circuit de traitement du signal issu du système B-pointes.

en supposant qu'elle soit uniforme dans l'échantillon et normale à la surface de mesure :

$$\Phi = \iint_{S_{sample}} \vec{B} \cdot \vec{n} dS = B S_{sample} = B \cdot 2h \cdot L_{pointes} \quad (5)$$

Une autre hypothèse essentielle pour simplifier l'équation (3) est que le champ magnétique est uniforme entre les deux points dans la zone de mesure. Ainsi, les intégrales surfaciques de la loi de Maxwell-Faraday deviennent des intégrales linéiques :

$$\frac{d\Phi}{dt}(S_{air\ b+}) = L_{pointes} \int_0^{h_{air}} \frac{dB}{dt} dz \quad (6)$$

$$\frac{d\Phi}{dt}(S_{air\ b-}) = L_{air} \int_{\delta}^{h_{air}} \frac{dB}{dt} dz \quad (7)$$

Il est important de minimiser le liftoff δ du fil de mesure du flux dans l'air : si δ est petit, la correction de ce terme est faisable dès qu'on connaît les distances L_{air} et $L_{pointes}$:

$$\frac{d\Phi}{dt}(S_{air\ b+}) - \frac{L_{pointes}}{L_{air}} \frac{d\Phi}{dt}(S_{air\ b-}) = \mu_0 L_{pointes} \int_0^{\delta} \frac{dH}{dt} dz \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{dt}(S_{sample}) + \mu_0 L_{air} \left[\left(\int_0^{\delta} \frac{dH}{dt} dz \right)_t + \left(\int_0^{\delta} \frac{dH}{dt} dz \right)_b \right] \\ = \left[e_1 - \frac{L_{pointes}}{L_{air}} e_2 \right] + \left[e_3 - \frac{L_{pointes}}{L_{air}} e_4 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Dans le cas idéal, où $\delta = 0$ et si l'équation (5) est vérifiée, alors on peut obtenir la variation d'induction magnétique $\frac{\delta B}{dt}$ en fonction des différentes grandeurs géométriques et des gains des amplificateurs :

$$\frac{dB}{dt} = \frac{1}{S_{sample}} \left[\frac{V_1}{G_1} - \frac{L_{pointes}}{L_{air}} \frac{V_2}{G_2} \right] + \left[\frac{V_3}{G_3} - \frac{L_{pointes}}{L_{air}} \frac{V_4}{G_4} \right] \quad (10)$$

Cette équation n'est vérifiée que si ces hypothèses le sont :
— le flux magnétique est uniforme dans l'échantillon ;

- le champ magnétique H est uniforme pour une hauteur donnée entre les pointes de mesure ;
- la boucle mesurant le flux magnétique dans l'air est en contact avec la surface de l'échantillon ;
- le circuit de traitement du signal est équivalent à un amplificateur parfait.

Cela montre qu'il faut apporter un soin particulier à la fois au système d'excitation magnétique et aux différents systèmes de traitement analogique du signal avant acquisition par ordinateur pour pouvoir garantir des mesures fiables avec le système B-pointes. D'autres sources d'erreur (déphasages angulaires et de position entre paires de pointes, incertitude sur les gains) ont un effet moindre sur la précision de mesure et peuvent être minimisés avec une conception soignée du système de mesure [7].

3. MESURES EXPÉRIMENTALES

L'appareil expérimental est montré à la figure 4. L'échantillon est composé d'un alliage d'acier bas-carbone (DC04) [10]. Deux noyaux magnétiques en fer-silicium identiques ont été utilisés pour assurer un flux magnétique symétrique. Le générateur de courant connecté aux bobines d'excitation est un Kepco BOP72-14MG. Le champ magnétique est lu à la surface de l'échantillon grâce à une sonde à effet Hall Projekt Elektronik AS-V3DM. Toutes les mesures ont été réalisées avec une fréquence d'échantillonnage de 5 kHz. De plus, le signal issu des pointes de mesure est amplifié d'un facteur 1000 grâce à un amplificateur-filtre Stanford Research SR560.

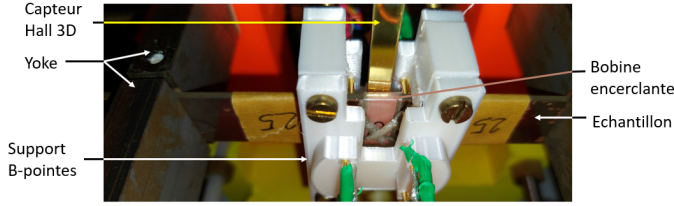


FIG. 4. Photo du système expérimental.

Le flux magnétique est mesuré à la fois avec une bobine encerclante de 25 spires (utilisée comme référence) et le montage B-pointes proposé, mis en place grâce à un support imprimé 3D et permettant des mesures 2D. Le système complet est représenté à la figure 5, et ses dimensions sont données dans le tableau 1.

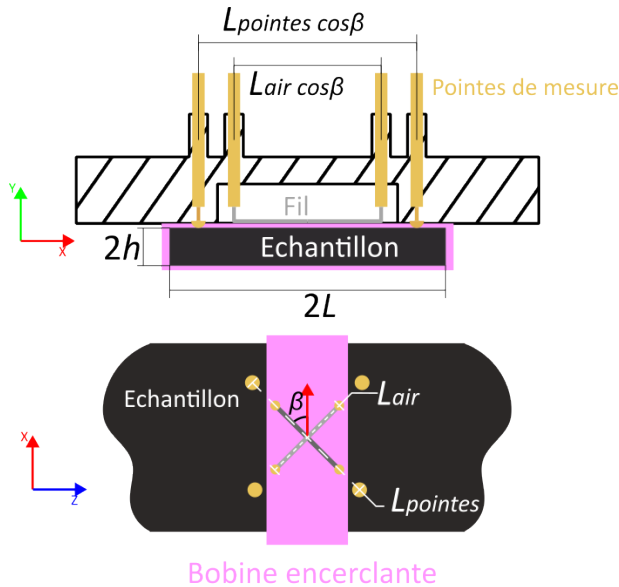


FIG. 5. Représentation du montage B-pointes 2D et de la bobine encerclante de référence.

TABEAU 1. Dimensions géométriques du système expérimental réalisé.

Paramètre	Valeur
$2h$ (mm)	2 ± 0.2
$2L$ (mm)	20 ± 0.5
δ (mm)	2 ± 0.5
h_{air} (mm)	35 ± 1
L_{air} (mm)	20 ± 0.5
$L_{pointes}$ (mm)	25 ± 0.5
β (°)	45 ± 1

Différents montages étudiés dans la littérature ont été comparés avec le montage proposé pour en évaluer les performances. Ces montages sont : le SCFA (Système avec Compensation du Flux dans l'Air) [9], le MO-1F et MO-2F (Montage Originel à 1 ou 2 Faces) [6] et le SPT (Système avec Pointes Transversales) [8], représentés sur la figure 6. Le montage proposé permet de simuler ces montages (sauf le SPT) en choisissant quelles tensions mesurées (e_1 , e_2 , e_3 et e_4) garder dans l'équation de Maxwell-Faraday :

$$\begin{cases}
 \text{Montage proposé : } \frac{d\Phi}{dt}(S_{\text{sample}}) = e_1 - e_2 + e_3 - e_4 & (11a) \\
 \text{MO-1F (côté A) : } \frac{d\Phi}{dt}(S_{\text{sample}}) = 2e_1 & (11b) \\
 \text{MO-1F (côté B) : } \frac{d\Phi}{dt}(S_{\text{sample}}) = 2e_3 & (11c) \\
 \text{MO-2F : } \frac{d\Phi}{dt}(S_{\text{sample}}) = e_1 + e_3 & (11d) \\
 \text{SCFA (côté A) : } \frac{d\Phi}{dt}(S_{\text{sample}}) = 2(e_1 - e_2) & (11e) \\
 \text{SCFA (côté B) : } \frac{d\Phi}{dt}(S_{\text{sample}}) = 2(e_3 - e_4) & (11f)
 \end{cases}$$

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés aux figures 7 et 8.

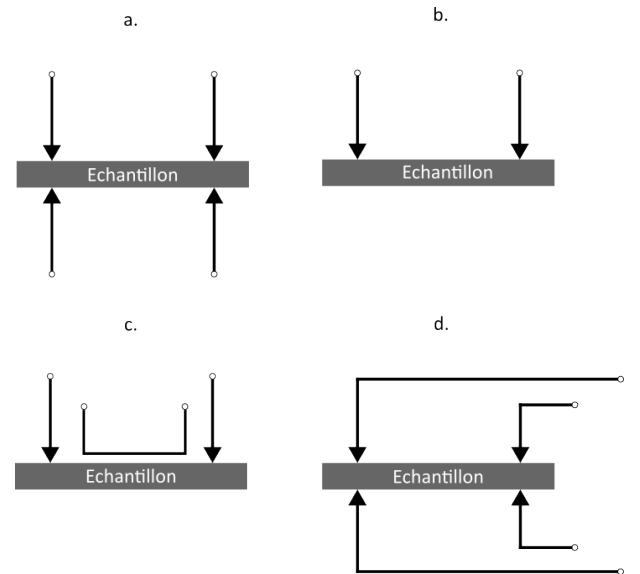


FIG. 6. Systèmes B-pointes trouvés dans la littérature et comparés avec le système proposé. a. : MO-2F, b. : MO-1F, c. : SCFA, d. : SPT.

Deux critères d'erreur ont été utilisés pour quantifier la différence entre la mesure de chaque système B-pointes avec la mesure issue de la bobine encerclante : l'erreur relative euclidienne et la différence maximale relative. Ces critères ont été calculés sur 30 cycles, ce qui a permis de calculer leur moyenne

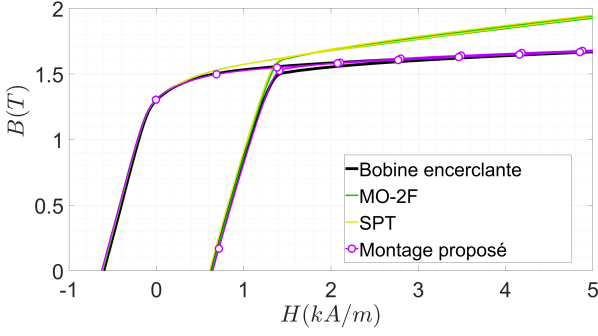


FIG. 7. Cycles $B(H)$ obtenus avec une bobine encerclante, deux montages symétriques de la littérature et le montage proposé.

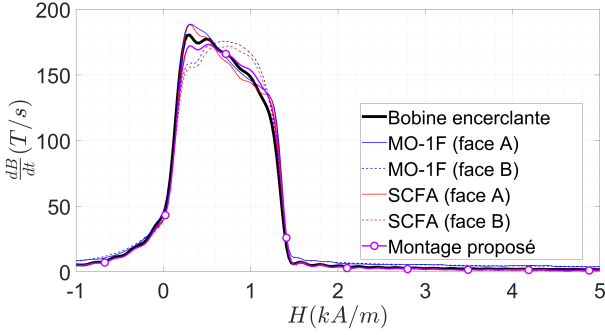


FIG. 8. Courbes $dB/dt(H)$ obtenus avec une bobine encerclante, deux montages asymétriques de la littérature et le montage proposé.

et leur écart-type, pour l'induction magnétique B et pour sa dérivée dB/dt . Les résultats sont présentés dans le tableau 2 pour B et 3 pour dB/dt .

TABEAU 2. Comparaison des performances de chaque montage B-pointes (B).

Setup	$\epsilon_{eucl}(\%)$			$\epsilon_{max}(\%)$		
	Min/Max	Moyenne	σ	Min/Max	Moyenne	σ
Montage proposé	0.78 / 1.00	0.86	0.07	3.29 / 3.77	3.53	0.14
SPT	23.39 / 23.80	23.61	0.09	31.03 / 31.31	31.17	0.07
MO-2F	22.58 / 22.91	22.74	0.07	29.86 / 30.16	30.00	0.08
MO-1F Côté A	22.52 / 22.88	22.69	0.08	29.84 / 30.14	29.98	0.08
MO-1F Côté B	22.65 / 22.90	22.78	0.07	29.87 / 30.17	30.01	0.07
SCFA Côté A	2.38 / 2.59	2.46	0.06	2.92 / 3.17	3.03	0.06
SCFA Côté B	2.84 / 3.15	2.96	0.10	6.07 / 7.28	6.71	0.32

TABEAU 3. Comparaison des performances de chaque montage B-pointes (dB/dt).

Setup	$\epsilon_{eucl}(\%)$			$\epsilon_{max}(\%)$		
	Min/Max	Moyenne	σ	Min/Max	Moyenne	σ
Montage proposé	5.80 / 5.94	5.88	0.05	8.29 / 8.62	8.39	0.09
SPT	9.88 / 11.70	10.63	0.67	10.13 / 15.35	12.88	2.36
MO-2F	9.81 / 9.87	9.84	0.02	10.21 / 10.40	10.31	0.05
MO-1F Côté A	10.23 / 10.31	10.24	0.02	14.92 / 15.45	15.28	0.13
MO-1F Côté B	12.24 / 12.38	12.30	0.03	12.20 / 13.73	12.41	0.32
SCFA Côté A	6.45 / 6.71	6.61	0.09	12.43 / 13.10	12.63	0.18
SCFA Côté B	9.40 / 9.52	9.46	0.04	14.36 / 14.61	14.49	0.07

On observe que le flux magnétique dans l'air perturbe considérablement les mesures des montages sans compensation, ces erreurs dépassant 20% pour le B . Cela est visible dans la figure 7 par la présence d'une dérive linéaire en fonction de l'excitation magnétique H . On peut aussi remarquer qu'il y a une légère asymétrie dans le dB/dt . En effet, les montages à une face (MO-1F et SCFA) donnent des mesures différentes selon le côté équipé avec les B-pointes.

Le montage proposé obtient les meilleurs résultats parmi les montages étudiés, parvenant à corriger deux sources principales d'erreur [7] : l'asymétrie du flux magnétique dans l'échantillon [6] et l'effet du flux magnétique dans l'air [9]. Pour réduire encore plus l'erreur (notamment sur le dB/dt), plusieurs pistes ont été envisagées :

- modifier le montage pour réduire le liftoff δ , pour l'instant minioré par l'épaisseur du fil de la bobine encerclante ;
- vérifier les niveaux de contrainte résiduelle dans l'échantillon, une source possible de l'asymétrie des mesures sur les montage à un côté ;
- ajouter d'autres B-pointes en parallèle pour améliorer le rapport signal-sur-bruit, au prix d'une chaîne de traitement analogique beaucoup plus complexe (l'addition et l'amplification précise des différents signaux devant être implémentées).

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail a permis d'identifier une disposition pour les B-pointes permettant une mesure sensible à l'asymétrie de flux magnétique dans l'échantillon, sans être impactée par le flux magnétique dans l'air. Le montage proposé, conçu pour une mesure 2D de flux magnétique, a été testé sur un cas unidirectionnel avec des résultats très concluants, l'erreur relative sur la courbe $B(H)$ obtenue étant inférieure à 1% par rapport à la mesure issue d'une bobine encerclante. La même erreur pour les autres méthodes atteint 2-3% pour le SCFA selon la face étudiée et 22% pour les autres méthodes testées.

Cette première version du système B-pointes montre l'intérêt de la correction du flux dans l'air et de la prise en compte d'asymétries dans le matériau. D'autres travaux sont en cours pour déployer cette solution pour la mesure magnétique 2D sur de tôles soumises à une contrainte mécanique biaxiale. Pour cela, deux pistes sont envisagées : l'optimisation de la distance $L_{pointes}$ et l'utilisation de circuits intégrés pour réduire l'incertitude sur les dimensions géométriques et intégrer la mesure du champ magnétique H aux cartes tout en réduisant l'encombrement du système actuel.

5. REMERCIEMENTS

Cette recherche a été financée en partie par l'Agence nationale de la recherche (ANR) au titre du projet ANR-22-CE42-0029-01 (projet -ENCORE-).

6. RÉFÉRENCES

- [1] S. Tumanski, "Induction coil sensors—a review," Meas. Sci. Technol., vol. 18, no. 3, pp. R31–R46, 2007.
- [2] S. Zurek, "Systematic measurement errors of local B-coils due to holes," Prz. Elektrotech., vol. 1, no. 3, pp. 8–14, 2018.
- [3] U. Aydin, F. Martin, P. Rasilo, A. Belahcen, A. Haavisto, D. Singh, L. Daniel et A. Arkkio, "Rotational single sheet tester for multiaxial magneto-mechanical effects in steel sheets," IEEE Trans. Magn., vol. 55, no. 3, pp. 1–10, 2019.
- [4] C. Delaunay, C. Joubert, et F. Sixdenier, "Behaviour of electrical steels under rotational magnetization and high temperatures," J. Magn. Magn. Mater., vol. 590, p. 171680, 2024.
- [5] A. Abderahmane et L. Daniel, "Measurement criteria for the magnetic characterization of magnetic materials," IEEE Trans. Instrum. Meas. vol. 72, pp. 1–18, 2023.

- [6] E. Czeija et R. Zawischa, "Vorrichtung zum messen des wechselinduktionsflusses oder der flußänderung in ferromagnetischen materialien aus der induktionsspannung," brevet AT180990, 1955.
- [7] P. Fagan, A. Abderahmane, M. Domenjoud et L. Daniel, "Magnetic hysteresis cycle measurements with a new needle probe setup," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 74, pp. 1-11, 2025.
- [8] G. Loisos et A. Moses, "Critical evaluation and limitations of localized flux density measurements in electrical steels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 2755-2757, 2001.
- [9] A. Abou-Elyazied Abdallah, P. Sergeant, G. Crevecoeur, L. Vandenbossche, L. Dupré et M. Sablik, "Magnetic material identification in geometries with non-uniform electromagnetic fields using global and local magnetic measurements," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 4157-4160, 2009.
- [10] M. Domenjoud et L. Daniel, "Effects of plastic strain and reloading stress on the magneto-mechanical behavior of electrical steels : Experiments and modeling," *Mech. Mater.*, vol. 176, p. 104510, 2023.