

Détection de fissures par courants de Foucault en utilisant la divergence de Kullback-Leibler

Jinane HARMOUCHE^{1,2}, Karim TOUT¹, Claude DELPHA¹, Yann LE BIHAN², Demba DIALLO²,

¹Laboratoire des Signaux et Systèmes
3 Rue Joliot Curie, Plateau de Moulon, 91192 Gif-Sur-Yvette, France

²Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris
11 Rue Joliot Curie, Plateau de Moulon, 91192 Gif-Sur-Yvette, France

Jinane.Harmouch@hotmail.com, Claude.Delpha@l2s.centralesupelec.fr
yann.le-bihan@geeps.centralesupelec.fr, Demba.Diallo@geeps.centralesupelec.fr

Résumé – Cet article étudie l’application de la Divergence de Kullback-Leibler (DKL) à la détection de petites fissures dans un matériau conducteur en utilisant le contrôle non-destructif par courants de Foucault. Il a comme objectif de répondre à ces questions: Est-ce que la DKL peut être utilisée comme un indicateur de défaut non paramétrique, permettant de détecter un changement général potentiellement dû à la présence d’un défaut naissant dans le cadre de cette application? Est-elle sensible aux défauts naissants dont la faible signature est imprévisible et noyée dans le bruit inhérent aux signaux ? Des résultats expérimentaux obtenus sur des signaux d’impédance prouvent la contribution de la DKL à la détection de petites fissures dont les dimensions sont de l’ordre de 0.1 mm dans les plaques conductrices. La divergence, comparée aux moments statistiques locaux, montre une plus grande sensibilité à la signature des petites fissures, qui est cachée dans le bruit.

Abstract – This paper investigates the application of the Kullback-Leibler Divergence(DKL) to the detection of small cracks in a conductive material using eddy currents non-destructive testing. It aims to answering these questions: Can the DKL be used as a non-parametric fault indicator to detect a general change, which is potentially due to the presence of an incipient fault in such an application ? Is it sensitive to incipient cracks whose dimensions are close to 0.1 mm and with random signature corrupted by noises ? Experimental results on Eddy Currents Testing (ECT) impedance signals show the capability of the DKL to detect small cracks in conductive plates. The divergence, compared to the local statistical moments, shows a higher sensitivity to the signature of small cracks, which is hidden in the noise.

1 Introduction

Le contrôle par courants de Foucault (en anglais Eddy Current Testing, ECT) est une technique bien établie de contrôle non-destructif des structures conductrices de courant [1]. La technique consiste à mesurer la variation d’impédance qui se produit dans une bobine excitée (la sonde) lors du balayage d’un matériau conducteur à tester. Les discontinuités, telles que les fissures, perturbent la trajectoire des courants de Foucault et affectent l’amplitude ainsi que la phase des courants induits. Par conséquent, une variation de la force électromotrice, mais aussi de l’impédance, de la bobine se produit. Le profil obtenu de l’impédance mesurée est directement lié à la présence de fissures dans le matériau testé.

En pratique, les mesures d’impédance sont sensibles à la présence de fissures, mais également à d’autres paramètres qui doivent être contrôlés ou pris en compte dans l’interprétation des résultats [2, 3]. La distance entre le capteur et le matériau sous test (variation de lift-off), les perturbations de l’environnement (variation de température, présence des champs électromagnétiques provenant de sources externes, etc.), les perturbations internes au capteur et au matériau (calibrage, bruit de

capteur, changement géométrique dans la structure, etc.) ainsi que les conditions d’exploitation affectent l’impédance de la sonde. Ces nuisances peuvent masquer la signature des fissures, surtout si cette dernière est petite. Dans la littérature, certaines techniques de débruitage ont été proposées pour améliorer le rapport signal-sur-bruit (RSB) des mesures [4]. Cependant, en pratique l’origine du bruit de fond ne peut pas être identifiée et la détection de petites fissures reste un défi majeur.

Ni l’inspection visuelle des profils d’impédance générés, ni leurs moments statistiques une fois calculés, ne permettent de détecter efficacement la présence des petites fissures, qui ont une signature faible par rapport au bruit de fond.

La divergence de Kullback-Leibler (DKL) est une distance informationnelle entre deux distributions de probabilité et joue un rôle clé dans la résolution des problèmes relatifs à la théorie de l’information et la détection de changement. Elle a été utilisée dans de nombreuses applications de traitement du signal, y compris la détection d’anomalie [5], la reconnaissance de formes [6] et le diagnostic de défauts [7, 8]. La littérature présente des résultats théoriques intéressants sur la contribution des propriétés de la DKL à l’obtention des indicateurs dédiés à la détection et l’estimation des défauts. Ces études sont no-

tamment développées dans un cadre fondé sur un modèle paramétrique, et dont la principale préoccupation est de détecter un changement particulier dans les paramètres du modèle d'un processus ou d'un signal. La divergence sera utilisée ici comme un indicateur de défauts non-paramétrique, visant à détecter un changement général de la distribution des mesures.

La divergence de Kullback-Leibler entre deux distributions de probabilité continues $f(x)$ et $g(x)$ d'une variable aléatoire x , est définie comme étant la version symétrique de l'information de Kullback-Leibler I entre ces deux distributions [9],

$$I(f\|g) = \int f(x) \log \frac{f(x)}{g(x)} dx, \quad (1)$$

$$DKL(f, g) = I(f\|g) + I(g\|f). \quad (2)$$

Elle est définie si $\sum_x f = 1$, $\sum_x g = 1$ et si les deux distributions partagent le même support. La DKL entre des distributions de probabilité arbitraires n'a pas de forme analytique. Son utilisation dans le cadre de la détection de changement à base de modèle est fondée sur l'hypothèse d'une distribution de probabilité suivant une loi normale conduisant à une expression analytique de la divergence. Ici, nous proposons d'évaluer la sensibilité aux petits changements dus aux défauts, sans connaissance *a priori* du type particulier que constitue la distribution des signaux, mais en utilisant une estimation numérique de la divergence.

2 Données : structure et prétraitement

Les données de mesure sont constituées des parties réelles et imaginaires de l'impédance acquise avec une fréquence d'excitation $f_{exc}=2$ MHz. Pour chaque fissure, deux cartographies 2D des variations d'impédance (par souci de simplicité on ne parlera que d'impédance) centrées sur la fissure sont obtenues [10]. La cartographie est de 40 points suivant la direction (y) et 32 points suivant la direction (x). Les points sont espacés de 0.1mm. La Fig.1 montre la cartographie de la variation de la partie imaginaire de l'impédance acquise pour une fissure de tailles $l_c=0.4$ mm et $d_c=0.6$ mm, où l_c désigne la longueur et d_c la profondeur de la fissure. Cette cartographie montre deux

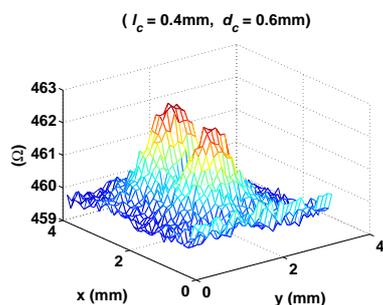


FIGURE 1 – Cartographie de la variation d'impédance d'une grande fissure

lobes de grande amplitude, indiquant la présence de la fissure. Au contraire, la détection des plus petites fissures est beaucoup

plus fastidieuse. La Fig.2 montre la variation d'impédance obtenue pour les plus petites fissures, à savoir les fissures de tailles ($l_c=0.1$ mm, $d_c=0.1$ mm) et ($l_c=0.2$ mm, $d_c=0.1$ mm). Ces carto-

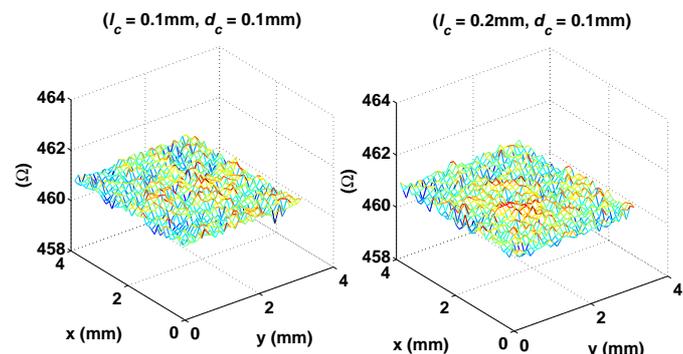


FIGURE 2 – Cartographie de la variation d'impédance des petites fissures

graphies ne montrent aucune variation significative rendant la détection des fissures non évidente. La signature des fissures est masquée par les variations saines dues au bruit. La DKL sera utilisée pour révéler cette signature après un prétraitement des données.

Il a été remarqué que les cartographies acquises pour les mêmes zones mais à différents moments peuvent ne pas avoir la même impédance de référence, qui dans notre cas est spécifiée par les valeurs aux bords des cartographies. Cela est dû aux variations des conditions environnementales, auxquels les courants de Foucault sont sensibles. Par conséquent, toutes les cartographies sont normalisées par rapport à leurs propres références. L'impact des conditions environnementales est ainsi réduit. Chaque cartographie normalisée est transformée en un vecteur d'impédances de $40 \times 32 = 1280$ valeurs. Un vecteur de référence est formé par les valeurs normalisées des bords des cartes, étant donné que les fissures sont au centre des cartographies et que les bords ne sont pas affectés par leur présence. Idéalement, le signal de référence serait obtenu à partir des mesures acquises sur une zone sans défaut.

Le contrôle par courants de Foucault est souvent utilisé pour la surveillance de l'état des structures de grande surface, puisqu'il permet un test relativement rapide. Pour se mettre dans cette configuration, nous élargissons artificiellement les cartographies afin d'atteindre 500×100 points, comme suit :

1. Concaténation aléatoire des échantillons issus des bordures (zones saines)
2. Ajout d'un bruit blanc Gaussien pour simuler les erreurs pouvant survenir lors du test des grandes surfaces

Il est à noter que dans le cas des surfaces rugueuses, le Rapport Signal-sur-Bruit (RSB) est bien souvent inférieur à 10 dB. Pour une surface de plaque lisse le RSB est de l'ordre de 20 dB. Pour notre étude, sachant que le banc de mesure est protégé des perturbations de l'environnement et que la plaque à tester est lisse, nous considérerons un RSB= 20 dB.

3 Validation expérimentale de la DKL

3.1 Calcul de la DKL

Pour chaque fissure, plusieurs signaux de la partie imaginaire de l'impédance sont créés selon le mode opératoire décrit ci-dessus. La détection des fissures utilisant la *DKL* consiste à (1) estimer la distribution de probabilité du signal d'impédance normalisée et ensuite (2) la comparer à la distribution de probabilité, estimée auparavant, du signal de référence. La Fig.3 montre les distributions de probabilité (pdfs) estimées pour le signal de référence et le signal en défaut correspondant à la fissure de taille $l_c = 0.4\text{mm}$, $d_c = 0.4\text{mm}$. Les distributions de probabilité ne suivent pas une loi normale et sont de plus très proches. En utilisant la divergence, les disparités entre les deux pdfs seront quantifiées. Une méthode intuitive et rapide pour

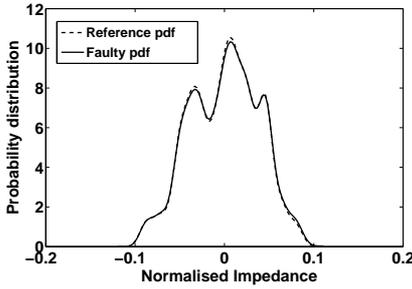


FIGURE 3 – Distribution de probabilité des signaux d'impédance normalisée

approximer la *DKL* entre deux distributions de probabilité arbitraires consiste à calculer sa forme discrète qui est fonction des distributions de probabilité empiriques [11]. Considérons une équipartition du signal de référence en l intervalles disjoints

$\{[s_0, s_0 + \Delta_s), [s_0 + \Delta_s, s_0 + 2\Delta_s), \dots, [s_0 + (l-1)\Delta_s, s_l)\}$

où s_0 et s_l sont les valeurs min et max du signal. Les probabilités $\{w_1, w_2, \dots, w_l\}$ des valeurs du signal de référence sont estimées grâce à un estimateur à noyau Gaussien. Les probabilités $\{u_1, u_2, \dots, u_l\}$ des valeurs du signal défectueux sont calculées de la même façon pour le même ensemble d'intervalles. Ensuite, la divergence est approximée comme suit :

$$\hat{D} = \sum_{i=1}^l (w_i - u_i) \log \frac{w_i}{u_i} \quad (3)$$

La procédure d'analyse suivante est adoptée :

- 50 réalisations (R) des signaux d'impédance correspondant à des zones saines sont générées.
- 50 autres réalisations sont créées pour chaque fissure.
- la moyenne μ est calculée pour chaque signal. \hat{D} est calculée entre la pdf correspondante et la pdf du signal de référence.
- Afin de comparer la sensibilité de μ et \hat{D} aux défauts, nous proposons d'évaluer, pour chaque critère, l'indice suivant :

$$\text{sensibilité} = \frac{\langle Cr \rangle_{R>50} - \langle Cr \rangle_{R<50}}{\max_{Cr}} \quad (4)$$

où Cr est le critère considéré, soit μ ou \hat{D} . Le symbole $\langle \rangle$ représente la valeur moyenne et \max_{Cr} est l'amplitude maximale par rapport à la valeur moyenne avant le défaut, voir Fig.4.

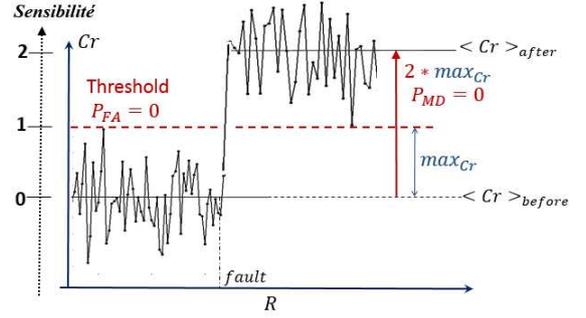


FIGURE 4 – Indice de sensibilité

L'intérêt de cet indice de sensibilité est qu'il est théoriquement directement lié au taux de non détection (P_{MD}). En effet, en considérant un seuil de détection qui permet un taux de fausse alarme (P_{FA}) égal à zéro, c'est à dire un seuil égal à l'amplitude maximale du critère avant le défaut, nous imposons zéro non détection à atteindre pour une *sensibilité* au moins égale à 2. Une autre valeur particulière de cet indice est 1 : la Fig.4 montre que pour une *sensibilité* = 1, $P_{MD} = 0.5$. En plus $0 < P_{MD} < 0.5$ dans le cas où $1 < \text{sensibilité} < 2$.

3.2 Résultats et discussion

Les résultats de détection sont illustrés en particulier dans le cas des petites fissures, pour lesquelles l'inspection visuelle des cartographies ne permet pas de détecter les défauts (Fig.2). Suite à l'application de la procédure d'analyse décrite ci-dessus, la Fig.5 a été obtenue. Les lignes en pointillés sont les seuils calculés pour μ et \hat{D} comme étant les valeurs maximales atteintes en absence de défaut.

L'évolution de μ ne permet pas de détecter les fissures de

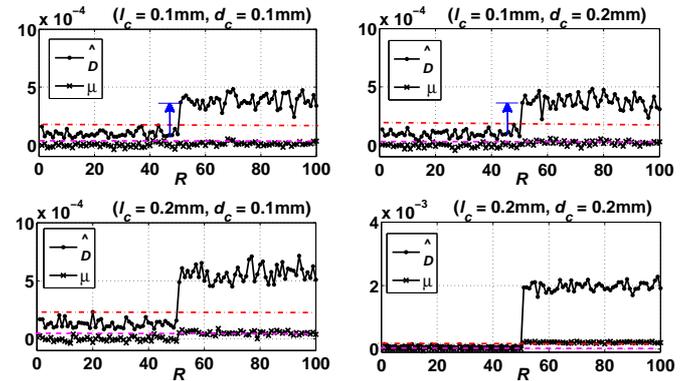


FIGURE 5 – Détection des petites fissures

tailles ($l_c = 0.1\text{mm}$, $d_c = 0.1\text{mm}$) et ($l_c = 0.2\text{mm}$, $d_c = 0.1\text{mm}$), tandis que \hat{D} est assez sensible à leur présence et montre une va-

TABLE 1 – Sensibilité aux petites fissures

(l_c, d_c) mm	Sensibilité	$\langle \hat{D} \rangle_{R>50} - \langle \hat{D} \rangle_{R<50}$	$\langle \mu \rangle_{R>50} - \langle \mu \rangle_{R<50}$
		$max_{\hat{D}}$	max_{μ}
0.1, 0.1		5.31	0.26
0.2, 0.1		5.73	0.47
0.1, 0.2		7.37	1.12
0.2, 0.2		23.8	3.64

riation importante. La sensibilité de μ et \hat{D} est évaluée et les résultats sont reportés dans le tableau 1. La divergence montre clairement une plus grande sensibilité aux petites fissures.

La variation de μ ne permet pas de détecter les petites fissures de taille ($l_c=0.1$ mm, $d_c=0.1$ mm) et ($l_c=0.2$ mm, $d_c=0.1$ mm) : la *sensibilité* < 1 ce qui signifie que $P_{MD} > 0.5$. μ ne peut donc permettre de détecter que la fissure la plus importante, de taille ($l_c=0.2$ mm, $d_c=0.2$ mm), sans erreur de détection. Cette fissure est, cependant, détectable visuellement sur la cartographie correspondante. \hat{D} permet de détecter avec succès tous les défauts, avec une P_{MD} nulle et des valeurs élevées de sensibilité (*sensibilité* > 2).

Les moments statistiques d'ordre supérieur, notamment la va-

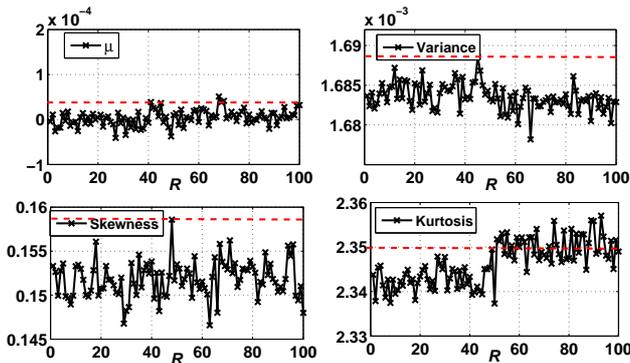


FIGURE 6 – Résultats de détection avec les quatre premiers moments statistiques

riance, le coefficient de dissymétrie (skewness), et le coefficient d'aplatissement (kurtosis), ne montrent pas une meilleure performance surtout quand la détection concerne la plus petite fissure ($l_c=0.1$ mm, $d_c=0.1$ mm). La Fig.6 montre le résultat obtenu. La variance et le skewness ne permettent pas de détecter le défaut : *sensibilité* = 0. La variation du Kurtosis est plus significative mais l'indice *sensibilité* dans ce cas vaut 1.33 (< 2), ce qui implique un taux de non détection non négligeable.

4 Conclusion

La divergence de Kullback-Leibler s'est montrée efficace dans la détection de petites fissures, dont la signature est cachée dans le bruit des signaux d'impédance issus du contrôle par courants de Foucault d'un matériau conducteur. C'est un indicateur de défaut non-paramétrique, conduisant à une sensibilité plus éle-

vée aux petits changements dus aux petites fissures que les moments statistiques locaux. Par ailleurs l'indicateur de sensibilité nous permet de montrer que l'on arrive à avoir un seuil de détection avec une probabilité de fausse alarme et une probabilité de non détection nulle. Il serait intéressant, par la suite, d'analyser la capacité de la divergence à représenter efficacement la sévérité des fissures.

Références

- [1] J. Garcia-Martin, J. Gomez-Gil, and E. Vazquez-Sanchez, "Non-destructive techniques based on eddy current testing," *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2525–2565, 2011.
- [2] H. Wang, B. Ju, W. Li, and Z. Feng, "Ultrastable eddy current displacement sensor working in harsh temperature environments with comprehensive self-temperature compensation," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 211, pp. 98–104, 2014.
- [3] Y. Yu, Y. Yan, F. Wang, G. Tian, and D. Zhang, "An approach to reduce lift-off noise in pulsed eddy current nondestructive technology," *NDT & E International*, vol. 63, pp. 1–6, 2014.
- [4] C. Huang, W. Xinjun, X. Zhiyuan, and Y. Kang, "Pulsed eddy current signal processing method for signal denoising in ferromagnetic plate testing," *NDT & E International*, vol. 43, no. 7, pp. 648–653, 2010.
- [5] J. Tajer, A. Makke, O. Salem, and A. Mehaoua, "A comparison between divergence measures for network anomaly detection," *7th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, pp. 1–5, 2011.
- [6] W. L. Hung and M. S. Yang, "On the j-divergence of intuitionistic fuzzy sets with its application to pattern recognition," *Information Sciences*, vol. 178, pp. 1641–1650, 2008.
- [7] A. K. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, pp. 1483–1510, 2006.
- [8] J. Harmouche, C. Delpha, and D. Diallo, "Incipient fault detection and diagnosis based on kullback-leibler divergence using principal component analysis : Part I," *Elsevier Signal Processing*, vol. 94, pp. 278–287, 2014.
- [9] S. Kullback and R. A. Leibler, "On information and sufficiency," *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 22, pp. 79–86, 1951.
- [10] Y. L. Bihan, J. Pavo, and C. Marchand, "Characterization of small cracks in eddy current testing," *The European Physical Journal Applied Physics*, vol. 43, no. 2, pp. 231–237, 2008.
- [11] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*. Wiley-Interscience, 2nd edition, 2006.