
Reconstruction de fissures 2D à partir d'images courants de Foucault utilisant un modèle direct semi-analytique

Éric Vourc'h¹, Thierry Bore², Caifang Cai³, Romain Soulat⁴

1. SATIE (ENS Cachan/CNRS/Paris-Saclay University), 61 av. du Président Wilson, 94230 Cachan, France

Eric.vourch@satie.ens-cachan.fr

2. School of Civil Engineering, University of Queensland, St Lucia, Australia

3. L2S, CentraleSupélec-CNRS-Univ. Paris-Sud, 3 rue Joliot-Curie, 91192 Gif sur Yvette, France

4. LSV (ENS Cachan/CNRS/Paris-Saclay University), 61 av. du Président Wilson, 94230 Cachan, France

RÉSUMÉ. Nous proposons une méthode pour reconstruire des fissures débouchantes bidimensionnelles dans des structures électriquement conductrices à partir d'images courants de Foucault. Cette méthode repose sur l'utilisation d'un modèle direct adapté aux systèmes mettant en œuvre une émission de courants de Foucault uniforme ; modèle que nous calculons au moyen d'une méthode semi-analytique. La méthode de reconstruction de fissures repose sur la comparaison d'images courants de Foucault issues du modèle considéré avec celle correspondant à la fissure recherchée. Elle est mise en œuvre au moyen d'un algorithme génétique. Sa précision est validée par une étude de performances effectuée jusqu'à des rapports signaux sur bruit relativement faibles.

ABSTRACT. We propose a method for reconstructing 2D surface cracks in electrically conducting parts from Eddy-current images. The proposed method relies on the use of a direct semi-analytic model suitable for Eddy-current systems featuring a uniform current excitation. The surface crack reconstruction approach is based on the comparison of eddy current images computed by the model with the eddy current image of the crack to reconstruct. The method is implemented by means of a genetic algorithm and accurate reconstruction is carried out with synthetic data.

MOTS-CLÉS : courants de Foucault, problème inverse, imagerie, algorithmes génétiques, modélisation semi-analytique, modèle direct, évaluation non destructive.

KEYWORDS: Eddy currents, inverse problem, imaging system, genetic algorithm, semi analytic modeling, direct model, non destructive evaluation.

DOI:10.3166/I2M.15.3-4.129-138 © 2016 Lavoisier

1. Introduction

Tous les secteurs industriels, à commencer par ceux soumis à de lourds impératifs de sécurité de fonctionnement (nucléaire, aéronautique, etc.), ont recours aux techniques d'évaluation non destructive (END) pour s'assurer du bon état de leurs matériels. Les techniques à courants de Foucault (CF) sont, avec les ultrasons (Kubini *et al.*, 2010), parmi les plus répandues (Bernieri *et al.*, 2008). Ceci en raison de leur facilité de mise en œuvre, de leur faible coût et de leur caractère non polluant. Elles sont réservées aux pièces électriquement conductrices où elles permettent de détecter des anomalies telles que des fissures ou de la corrosion. Cependant la reconstruction précise de la géométrie de fissures et autres défauts à partir de données CF reste une problématique scientifique ouverte, notamment du fait que l'inversion de telles données dépend d'un problème mal posé (Colton *et al.*, 1992 ; Isakov *et al.*, 1993 ; Yamamoto *et al.*, 1997).

Pour résoudre différentes approches sont envisageables, comme les méthodes de régularisation (Ribeiro *et al.*, 2014), ou l'utilisation de modèles d'interpolation rapide (tels que les méta-modèles issus de bases de données) et l'estimation d'un nombre réduit de paramètres caractéristiques de la forme des défauts (Douvenot *et al.*, 2011). Etant donné que l'une des principales difficultés de l'inversion tient à l'établissement d'un critère de confiance sur le résultat de l'algorithme, des approches statistiques (de type Monte Carlo ; Cai *et al.*, 2009) sont aussi étudiées. Elles nécessitent cependant un grand nombre de résolutions du problème direct. Des approches non itératives sont également envisagées, qui reposent sur des tests ponctuels de la structure inspectée en vue d'applications d'END en quasi-temps réel (Tamburino *et al.*, 2010).

2. Modèle direct de fissures pour les systèmes à courants de Foucault à émission globale

Les techniques d'END associent système d'émission/réception et traitements des données et signaux. Si le système CF doit être conçu en fonction des caractéristiques, notamment géométriques, de la structure inspectée afin d'optimiser le signal mesuré, il est également souhaitable d'adapter la méthode d'inversion à la configuration expérimentale. Ce qui peut impliquer, le cas échéant, d'adapter le modèle sur lequel elle repose. Telle est l'approche proposée ici.

Nous considérons les systèmes dits à émission globale qui mettent en œuvre une excitation harmonique et induisent dans la cible inspectée une nappe de CF uniforme (par opposition aux systèmes à excitation circulaire : figure 1) (Koyama *et al.*, 2000).

De tels systèmes sont sensibles à la présence de fissures et génèrent un champ magnétique significatif perpendiculairement à la surface de la structure inspectée. Du point de vue de la modélisation ces cas de figure sont intéressants car ils autorisent certaines simplifications : il a en effet été démontré que les interactions

entre une nappe de CF uniforme et une fissure pouvaient être correctement et relativement simplement modélisées au moyen de sources de courant virtuelles localisées dans le volume même de la fissure (Thomas *et al.*, 2010 ; Sabbagh *et al.*, 1986).

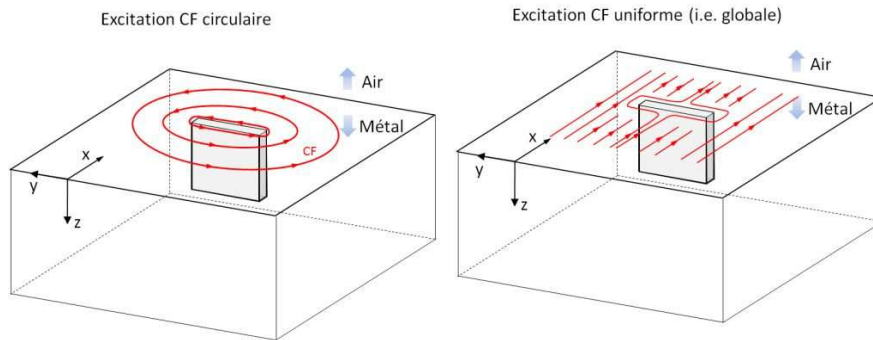


Figure 1. Distinction entre systèmes CF à configuration d'émission circulaire et uniforme (i.e. globale).

Le calcul d'un tel modèle peut en outre être effectué au moyen de la méthode des points sources distribués (DPSM), comme illustré figure 1. Il s'agit d'une méthode semi-analytique pour laquelle les sources actives présentes dans l'espace de travail sont modélisées par un ensemble de sources rayonnantes élémentaires (de type fonctions de Green) (Placko *et al.*, 2012). En plus des sources actives, des sources virtuelles d'interface permettent de prendre en compte les conditions aux limites. Seul le lieu des sources actives et d'interface et la zone où l'on souhaite calculer (par superposition des contributions des sources rayonnantes) les grandeurs physiques d'intérêt demandent à être maillés. Grâce à quoi la méthode DPSM offre un temps de calcul réduit comparativement aux méthodes de type éléments finis (Placko *et al.*, 2012).

Nous n'entrerons pas ici dans les détails de la méthode DPSM, une description détaillée étant disponible dans la référence (Placko *et al.*, 2012). Notre propos se limitera aux principaux éléments de la mise en œuvre du modèle CF simplifié proposé figure 2. Dans ce cas, l'espace de travail est divisé en deux milieux : l'air et le métal, et la grandeur physique d'intérêt (*i.e.* la distribution de la composante verticale b_z du champ magnétique dans l'air au dessus de la surface de la structure métallique) calculée comme la somme des contributions des sources virtuelles d'interface rayonnant dans l'air. En pratique le problème est formulé de telle manière à ce que b_z soit calculé comme le produit d'une matrice par un vecteur représentant les sources virtuelles de CF placées dans le volume de la fissure.

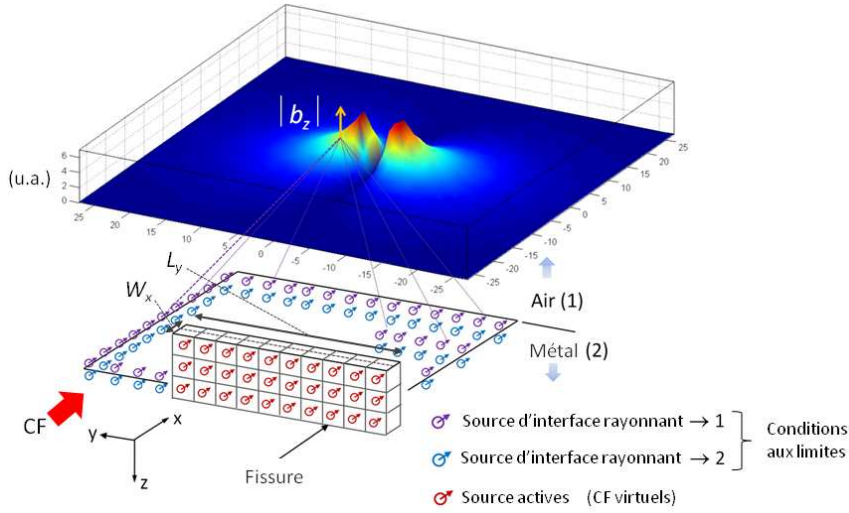


Figure 2. Modélisation DPSM des interactions entre une fissure parallélépipédique et une nappe de CF uniforme ; cartographie du module de la composante verticale du champ magnétique au dessus de la cible

Il est à noter que pour une bonne précision du modèle il est nécessaire que l'interface soit maillée en respectant une distance entre sources inférieure au tiers de la distance caractéristique du problème électromagnétique, laquelle est en l'espèce typiquement de l'ordre de l'épaisseur de peau δ :

$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \sigma \mu_0 \mu_r} \quad (1)$$

où f est la fréquence des CF, μ_0 la perméabilité magnétique du vide, μ_r la perméabilité magnétique relative et σ la conductivité électrique du métal.

Tableau 1. Configuration de maillage des simulations DPSM

	Position z	Dimension x		Dimension y	
	(mm)	(mm)	(pixels)	(mm)	(pixels)
Plan des sources actives	-2	20	$n = 40$	20	$m = 40$
Cartographie b_z	0	54	$n = 40$	54	$m = 40$

Pour l'ensemble des simulations présentées dans cet article la configuration de discrétisation de l'espace de travail utilisée est celle décrite dans le tableau 1. Le

métal choisi pour la cible est un alliage d'aluminium de conductivité électrique $\sigma = 16 \text{ MS.m}^{-1}$ (typique d'applications aéronautiques) et de permittivité diélectrique relative $\mu_r = 1$. La fréquence f des CF est fixée à 400 Hz et le maillage de l'interface satisfait la condition mentionnée plus haut, les sources d'interface étant espacées de $\delta/3$ ($\approx 6 \text{ mm}$). Les CF sont orientés le long de l'axe x conformément à la figure 2.

La figure 3 présente des simulations par méthode DPSM illustrant de manière qualitative l'influence de la longueur L_y d'une fissure sur l'image CF engendrée. Cette influence est particulièrement patente sur l'espacement des maxima des images.

Partant, une méthode de reconstruction de fissures reposant sur la comparaison d'images CF (*i.e.* de cartographies de la composante normale du champ magnétique à la surface de la cible) paraît envisageable.

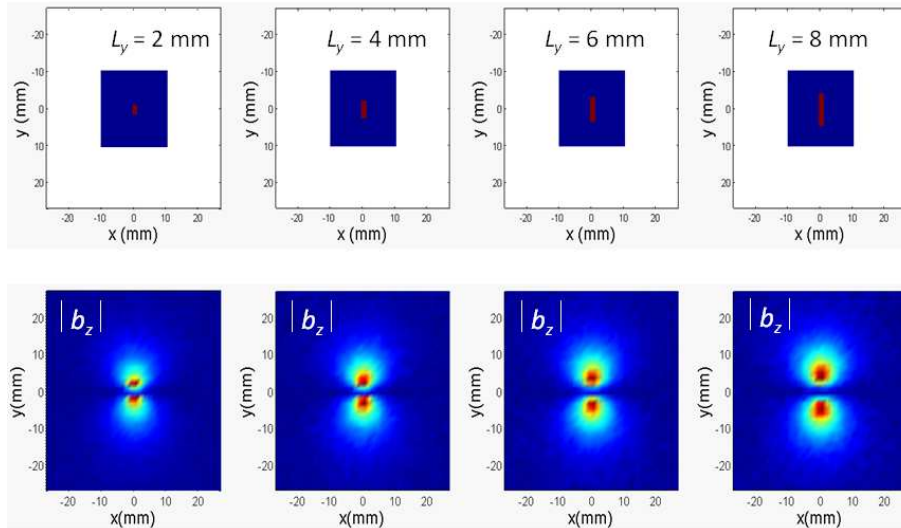


Figure 3. Modélisation par DPSM de la cartographie de la composante normale b_z du champ magnétique (représentation de son module) produite à la surface d'une plaque d'aluminium par des fissures longitudinales de largeur $W_x = 1 \text{ mm}$ et de longueur L_y allant de 2 à 8 mm. Rapport signal sur bruit de 20 dB

3. Étude paramétrique d'images courants de Foucault

La méthode de reconstruction de fissures que nous proposons est envisagée ici pour des fissures en deux dimensions (2D) débouchantes (affleurant la sur face de la pièce métallique). Nous considérons l'utilisation de différents critères de comparaison d'images dont nous allons étudier la pertinence avant que de concevoir l'algorithme de reconstruction de fissures.

Notons $\mathbf{b}_z \in \mathbb{C}^M$ le vecteur concaténant le champ magnétique vertical à la surface de la cible métallique, où $M = m \times m$ est la dimension de l'image (*i.e.* de la cartographie). Considérons 3 critères de comparaison d'images : une erreur de corrélation ε_ρ , une erreur quadratique moyenne ε_{mse} et une erreur quadratique moyenne pondérée ε_{wmse} , définies comme des erreurs relatives entre \mathbf{b}_z et une référence \mathbf{b}_{z0} d'après les formules suivantes :

$$\varepsilon_\rho = \frac{[\mathbf{b}_z - E(\mathbf{b}_z)]' [\mathbf{b}_z - E(\mathbf{b}_{z0})]}{\sqrt{[\mathbf{b}_z - E(\mathbf{b}_z)]' [\mathbf{b}_z - E(\mathbf{b}_z)]} \sqrt{[\mathbf{b}_{z0} - E(\mathbf{b}_{z0})]' [\mathbf{b}_{z0} - E(\mathbf{b}_{z0})]}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{mse} = \frac{[\mathbf{b}_z - \mathbf{b}_{z0}]' [\mathbf{b}_z - \mathbf{b}_{z0}]}{\mathbf{b}_{z0}' \mathbf{b}_{z0}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{wmse} = \frac{[\mathbf{b}_z - \mathbf{b}_{z0}]' W [\mathbf{b}_z - \mathbf{b}_{z0}]}{\mathbf{b}_{z0}' W \mathbf{b}_{z0}} \quad (4)$$

où $W = \text{diag}|\mathbf{b}_{z0}|$ est la matrice diagonale portant $|\mathbf{b}_{z0}|$ sur la diagonale. Dans (3) et (4), la normalisation est faite par rapport à l'énergie totale (ou énergie pondérée) de la référence \mathbf{b}_{z0} .

La figure 4 illustre une étude paramétrique menée sur les critères mentionnés ci-dessus. On constate que le critère de corrélation ε_ρ s'avère peu sensible à la largeur de fissure W_x mais sensible à la longueur L_y . Le critère de moindres carrés ε_{mse} est quant à lui sensible tant à W_x qu'à L_y , tandis que le critère de moindres carrés pondéré ε_{wmse} l'est également, mais offre une dynamique de variations bien plus importante (liée au fait que le poids est porté sur les pixels de l'image porteurs d'information).

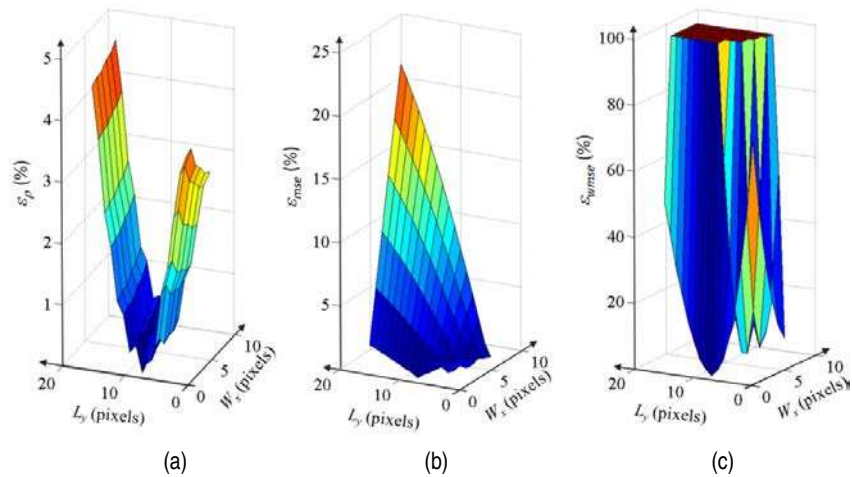


Figure 4. ε_ρ , ε_{mse} et ε_{wmse} pour des fissures 2D rectangulaires débouchantes comparées à une fissure de référence de dimensions $0,5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ($1 \text{ pixel} \Leftrightarrow 0,5 \text{ mm}$)

Des trois critères considérés, celui des moindres carrés pondéré apparaît donc comme le plus judicieux à appliquer en vue d'une reconstruction de fissures 2D. Par ailleurs, la présence de multiples minima (cohérente avec la nature mal posée des problèmes CF) sur les trois graphiques (figure 4) indique qu'une reconstruction au moyen d'un algorithme génétique (AG) est plus pertinente qu'une méthode de gradient – étant donnée la place laissée au hasard dans le processus d'itération d'un AG, laquelle permet de limiter le risque de converger vers un minimum local.

4. Reconstruction de fissures par algorithme génétique

Nous avons conçu un AG (Goldberg *et al.*, 1988 ; Ahn, 2006) destiné à reconstruire des fissures 2D débouchantes (figure 5). Il utilise une population de 4 individus (fissures). A chaque itération, leur proximité à la fissure recherchée est évaluée au moyen d'une fonction objectif reposant sur une comparaison (par corrélation, moindres carrés ou bien moindres carrés pondérés) d'images produites au moyen du modèle direct. Une sélection d'individus est effectuée au moyen d'une roue de la fortune et suivie d'une mutation de la population (en variant aléatoirement selon une loi gaussienne les dimensions W_x et L_y des individus sélectionnés). L'initialisation de la population consiste en un choix aléatoire d'individus satisfaisant un critère minimum de proximité avec l'objectif.

Tableau 2. Statistiques de convergence de l'AG

Fonctions objectifs	Nombre moyen d'itérations	Ecart type
ϵ_ρ	23,13	20,10
ϵ_{mse}	22,69	17,68
ϵ_{wmse}	16,83	13,65

Statistiques basées sur 100 tirages de l'AG pour chacune des fonctions objectif. Fissure recherchée / $\{W_x = 0.5 \text{ mm}, L_y = 4 \text{ mm}\}$, avec b_{20} présentant un SNR de 30 dB

Des statistiques de convergence de l'AG ont été faites pour des fonctions objectifs relatives à chacun des trois critères de comparaison d'image considérés (tableau 2). Quelle que soit la fonction objectif, l'AG converge vers la bonne solution $\{W_x, L_y\}$. Le nombre moyen d'itérations nécessaire pour converger vers la bonne solution est respectivement de 23, 22 et 17 pour les trois critères susmentionnés (d'après une étude faite sur 100 tirages de l'AG pour un rapport signal sur bruit (SNR) de l'image recherchée de 30 dB). La convergence plus rapide obtenue avec la fonction objectif de type moindres carrés pondérés est conforme aux résultats de l'étude de sensibilité précédente.

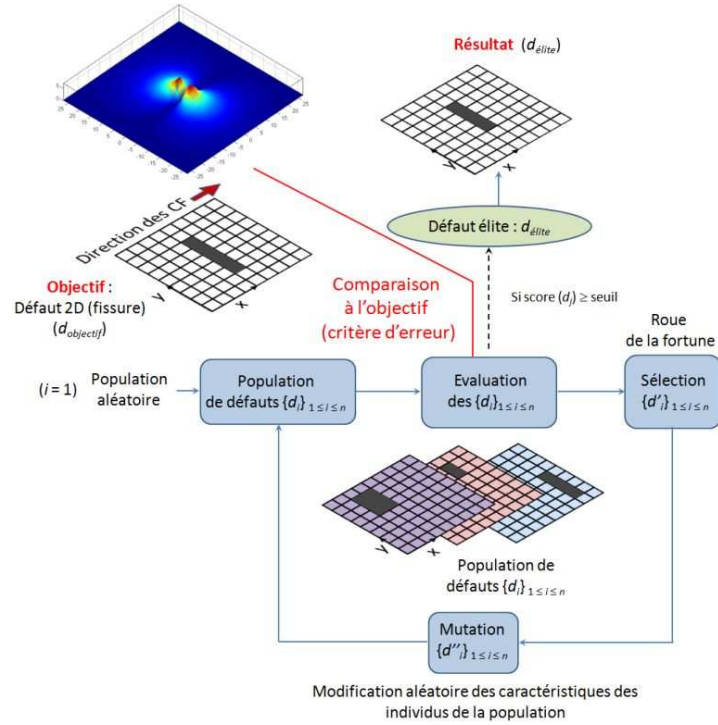


Figure 5. Algorithme génétique de reconstruction de fissures à partir d'images CF

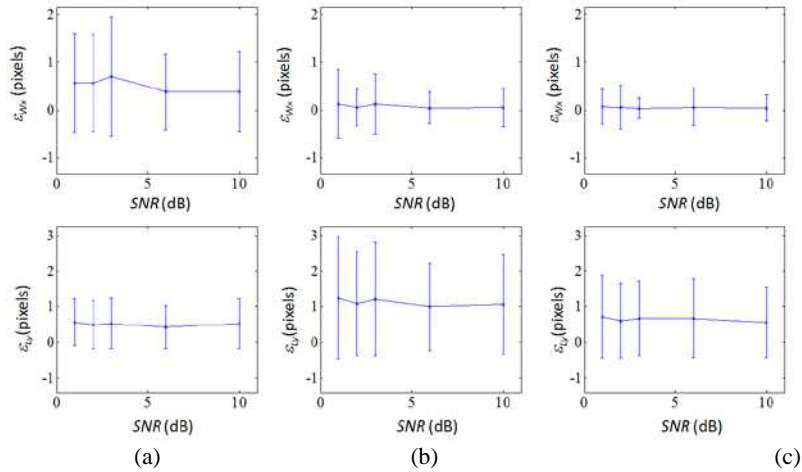


Figure 6. Performances d'estimation de W_x et L_y (espérance et écart type de \hat{W}_x et \hat{L}_y pour 250 tirages de l'AG limité à 15 itérations). $\{W_x = 0.5 \text{ mm}, L_y = 4 \text{ mm}\} \Leftrightarrow \{W_x = 1 \text{ pixel}, L_y = 8 \text{ pixels}\}$. Résultats obtenus à partir du critère d'erreur : (a) ϵ_p , (b) ϵ_{mse} et (c) ϵ_{vmse}

Pour examiner plus avant les performances d'estimation de l'algorithme, une étude a été faite en limitant à 15 le nombre d'itérations autorisé par tirage, ce qui est inférieur à la valeur moyenne nécessaire pour converger vers la bonne solution en présence d'un excellent RSB. 250 tirages de l'AG ont été faits pour chacune de trois fonctions objectifs et ce pour 5 valeurs de SNR (figure 6). Cette étude de performance montre que la méthode de reconstruction proposée est précise, même à faible rapport signal sur bruit, et ce pour les trois fonctions objectif testées. On constate que la plus précise des trois est celle basée sur les moindres carrés pondérés. Ce qui, là encore, est cohérent avec l'étude de sensibilité précédente.

5. Conclusion

Une méthode de reconstruction de fissures 2D débouchantes à partir d'images courants de Foucault basée sur l'utilisation d'un modèle direct semi-analytique a été proposée. Cette méthode a été mise en œuvre au moyen d'un algorithme génétique et testée sur des données simulées. Une étude de performances a été faite, qui en a démontré la précision même à faible rapport signal sur bruit. Ceci est de bon augure en ce qui concerne son extension à la reconstruction de fissures en trois dimensions.

Bibliographie

- Ahn C. W. (2006). *Advances in evolutionary algorithms*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Bernieri A., Ferrigno L., Laracca M., Molinara M. (2008). Crack shape reconstruction in eddy current testing using machine learning systems for regression. *instrumentation and measurement, IEEE transactions on*, vol. 57, n° 9, p. 1958-1968.
- Cai C., Rodet T., Lamber M. (2014). Influence of partially known parameter on flaw characterization in Eddy Current Testing by using a random walk MCMC method based on metamodeling. In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 542, n° 1, p. 012009. IOP Publishing.
- Colton D., Päiväranta L. (1992). The uniqueness of a solution to an inverse scattering problem for electromagnetic waves. *Archive for rational mechanics and analysis*, vol. 119, n° 1, p. 59-70.
- Douvenot R., Lambert M., Lesselier D. (2011). Adaptive metamodels for crack characterization in eddy-current testing. *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 47, n° 4, p. 746-755.
- Goldberg D. E., Holland J. H. (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, vol. 3, n° 2, p. 95-99.
- Isakov V. (1993). Uniqueness and stability in multi-dimensional inverse problems. *Inverse Problems*, vol. 9, n° 6, p. 579.
- Koyama, K., Hoshikawa, H., Taniyama N. (2000, October). Investigation of eddy current testing of weld zone by uniform eddy current probe. In *Proceedings of WCNDT*.

- Kubinyi M., Docekal A., Ramos H., Ribeiro A. (2010). Signal processing for non-contact NDE. *Przeegląd Elektrotechniczny*, vol. 86, n° 1, p. 249-254.
- Placko D., Bore T., Kundu T. (2012). *Ultrasonic and Electromagnetic NDE for Structure and Material Characterization: Engineering and Biomedical Applications*. CRC Press.
- Ribeiro A. L., Ramos H. G., Pasadas D., Rocha T. (2014, February). Regularization methods to assess the eddy current density inside conductive non-ferromagnetic media. In *40th Annual Review Of Progress In Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 10th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing*, vol. 1581, n° 1, AIP Publishing, p. 1428-1432.
- Sabbagh H. A., Sabbagh L. D. (1986). An eddy-current model for three-dimensional inversion. *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 22, n° 4, p. 282-291.
- Tamburrino A., Calvano F., Ventre S., Rubinacci G. (2012). Non-iterative imaging method for experimental data inversion in eddy current tomography. *NDT & E International*, 47, p. 26-34.
- Thomas V., Joubert P. Y., Vourc'h E., Placko D. (2010, February). A novel modeling of surface breaking defects for eddy current quantitative imaging. In *Sensors Applications Symposium (SAS), 2010 IEEE*, IEEE, p. 154-157.
- Yamamoto M. (1997). A mathematical aspect of inverse problems for non-stationary Maxwell's equations. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 8, n° 1, p. 77-98.