

PERFORMANCES D'UNE SONDE MATRICIELLE À MICROBOBINES POUR LA DÉTECTION PAR COURANTS DE FOUCAULT DE DÉFAUTS DÉBOUCHANTS DE FAIBLES DIMENSIONS

PERFORMANCES OF EDDY CURRENT MICROCOIL ARRAY SENSOR FOR THE DETECTION OF SMALL SURFACE BREAKING NOTCH DETECTION

C. Ravat^{1,2}, P.-Y. Joubert², Y. Le Bihan¹, C. Marchand¹, M. Woytasik³, E. Dufour-Gergam³,
¹LGEP/SPEE Labs; CNRS UMR 8507; SUPELEC; Univ Pierre et Marie Curie-P6; Univ Paris
Sud-P11; F-91192 Gif-sur-Yvette

²SATIE, ENS Cachan, CNRS, UniverSud, 61 av. du President Wilson, 94235 CACHAN
Cedex, FRANCE

³IEF; CNRS UMR 8622; Univ Paris Sud-P11; Bât 220, F-91405 Orsay Cedex

Résumé

Dans cet article, une étude a été conduite sur la conception d'une matrice de microcapteurs dédiée aux applications de contrôle non destructif par courants de Foucault. Une sonde matricielle 1-D de trois microbobines a été réalisée par microtechnologies. Chaque bobine pouvant être utilisée comme émetteur ou récepteur, cinq différentes stratégies d'émission-réception ont été considérées dans le cadre de l'inspection d'une cible en alliage de nickel comportant plusieurs défauts débouchants calibrés. La stratégie la plus efficace a été déterminée et des calculs de rapport signal sur bruit (RSB) ont été effectués. Des défauts aussi petits que $0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$ ont été détectés avec un RSB de 15 dB. Les performances de détection ont été alors analysées statistiquement à l'aide de « caractéristiques opérationnelles de résultat » avec un pas spatial de mesure aussi large que le côté d'une bobine. Les défauts de dimension $0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$ ont été détectés dans 68% des cas.

Abstract

In this paper, an experimental study was carried out for the design of microsensor arrays dedicated to eddy current non destructive applications. A 3-microcoil 1-D array sensor was realized thanks to microtechnologies. Since each coil can be used as a transmitter or a receiver, five different transmission-reception strategies were considered for the inspection of a nickel based alloy target, featuring several calibrated surface breaking notches. The most efficient strategy was determined and signal to noise ratio (SNR) computations were performed. Notches as small as $0.1 \times 0.1 \times 0.1 \text{ mm}^3$ were detected with a 15 dB SNR. Then the detection performances were statistically analyzed thanks to "receiver operational characteristic" with a spatial step as large as the coil size. $0.1 \times 0.1 \times 0.1 \text{ mm}^3$ notches were detected in 68% of the cases.

INTRODUCTION

Les capteurs à courants de Foucault (CF) sont largement utilisés dans le contrôle non destructif des matériaux électriquement conducteurs, grâce à leur sensibilité aux défauts comme les fissures de fatigue, les inclusions ou les effets de la corrosion. Ils sont aussi faciles à mettre en œuvre et robustes dans le cadre d'une utilisation industrielle. Cependant, le besoin grandissant de fiabilité et de rapidité pour les opérations d'inspection requiert le développement de nouveaux systèmes.

Dans ce contexte, des systèmes d'imagerie par courants de Foucault ont été récemment développés afin de produire des images CF obtenues par des procédures de balayages réduites et ayant pourtant de hautes possibilités de caractérisation des défauts. Leur principe est basé sur la combinaison d'un large émetteur CF utilisé pour exciter la structure à contrôler et d'un matériel de mesure utilisé pour mesurer l'intensité du flux du champ magnétique induit à la surface de la structure. Le matériel de mesure est conçu spécifiquement pour fournir une haute résolution et/ou sensibilité spatiale, afin que les défauts puissent être efficacement caractérisés.

Par exemple, un système imageur magnéto-optique (MO) CF a été décrit dans [1]. Cet appareil utilise un grenat MO linéaire au sein d'un montage optique dédié à la mesure de la distribution spatiale 2-D de la densité de flux magnétique. Les images CF obtenues offrent une haute résolution spatiale ($100 \times 100 \mu\text{m}^2$) sur une large surface d'inspection (disque de diamètre 45 mm) pour une position donnée de l'imageur.

D'autres imageurs CF matriciels utilisant des multicapteurs à haute sensibilité comme les GMR ont aussi été développés et présentés dans [2,3]. Ces appareils permettent d'obtenir des images CF avec une haute sensibilité [2] ou une haute résolution [3], tout en réduisant les procédures de balayage.

Pour cette étude, une sonde matricielle de microbobines a été utilisée pour détecter des défauts débouchants de faibles dimensions. L'utilisation de microbobines est particulièrement adaptée à la détection de petits défauts grâce à leur haute sensibilité alliée à une bonne résolution spatiale. De plus, les microbobines peuvent être indifféremment utilisées comme émetteur ou comme récepteur. Les matrices de microbobines permettent donc l'implémentation de nombreuses stratégies d'émission-réception et l'amélioration de la sensibilité globale de la sonde indépendamment des conditions d'opération ou de l'orientation des défauts [4,5].

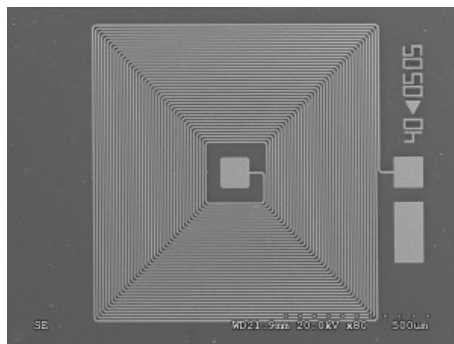
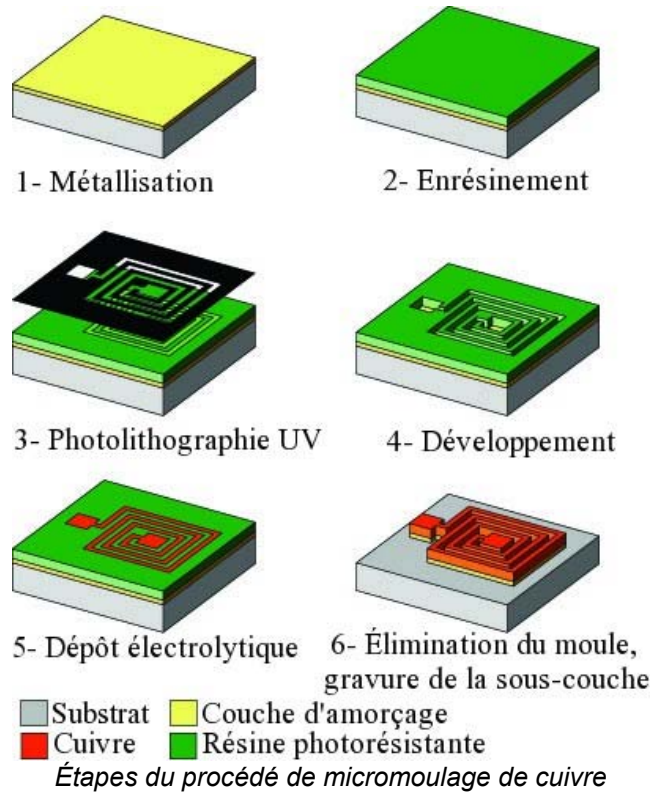
Dans ce papier, une nouvelle sonde matricielle 1-D à trois microbobines est utilisée et évaluée dans le cadre de la détection de défauts débouchants de faibles dimensions. En premier lieu, le procédé de fabrication des microbobines est décrit. Ensuite, cinq stratégies d'agencement sont proposées et comparées. La plus efficace est utilisée dans des conditions dégradées et l'influence de la fréquence d'excitation est quantifiée à l'aide de Caractéristiques Opérationnelles de Résultat (COR).

MATERIEL EXPERIMENTAL

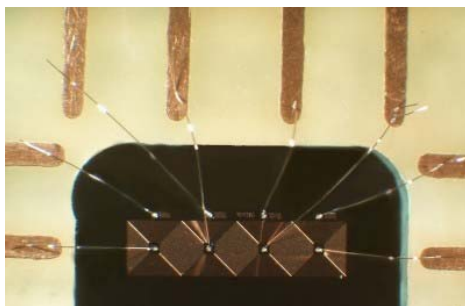
Procédé de fabrication des microbobines

Les microbobines sont fabriquées par micromoulage de cuivre sur un substrat de silicium. Les deux principales étapes de ce procédé sont la lithographie UV d'une couche de résine épaisse et le dépôt électrolytique de cuivre dans le moule en résine isolante ainsi créé. Ce procédé de fabrication a été entièrement décrit dans [6].

Les microbobines utilisées comportent 40 tours occupant une surface carrée de 1 mm^2 . Les dimensions des pistes sont $8 \mu\text{m}$ d'épaisseur, $5 \mu\text{m}$ de largeur et d'espacement. Des plots de connexion sont ajoutés au centre et en bordure de chaque microbobine dont l'inductance et la résistance vaut respectivement $1 \pm 0.1 \mu\text{H}$ et $55 \pm 1 \Omega$ [7]. La structure entière est fixée sur une carte époxy et chaque plot de connexion est microsoudé avec un fil d'aluminium de $25 \mu\text{m}$ de diamètre.



Vue au MEB d'une microbobine de 1 mm de côté et comportant 40 tours



Quatre microbobines en ligne (trois seulement sont utilisées dans cette étude)

Principe du contrôle par CF

Le principe de base du contrôle par CF réside dans l'induction de courants dits courants de Foucault à l'intérieur du matériau inspecté (émission) et dans la mesure des variations du champ magnétique résultant à la surface du matériau, qui dépend de l'intégrité du matériau [8]. En pratique, le signal CF dû à un défaut est la variation du rapport (en amplitude et en phase) entre la force électromotrice générée entre les bornes de l'élément de réception et le courant d'excitation traversant l'élément d'émission.

L'intensité des CF décroît grossièrement d'une façon exponentielle avec la distance à la surface du matériau. La distance caractéristique, appelée profondeur de pénétration, est exprimée par

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu \sigma f}}$$

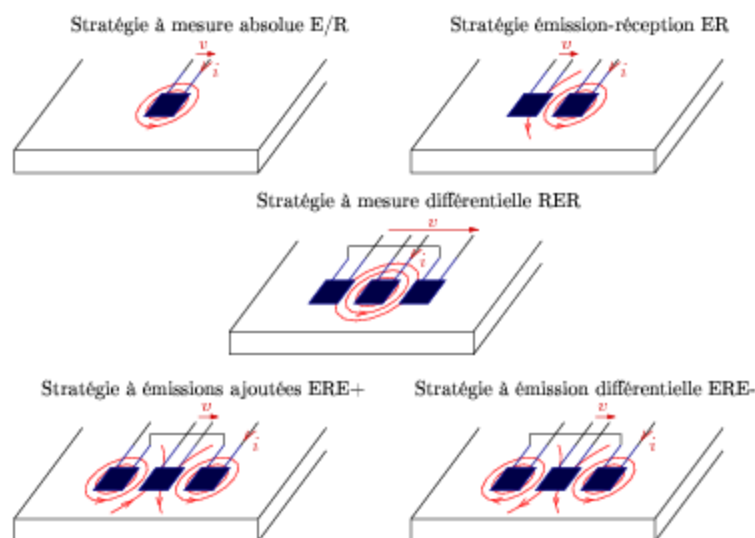
où μ est la perméabilité magnétique du matériau, σ la conductivité électrique et f est la fréquence du courant d'excitation.

Stratégies d'agencement de la matrice

Les microbobines peuvent être utilisées à la fois comme émetteur (E), récepteur (R) ou émetteur-récepteur (E-R). Ainsi, il est possible de définir pour une matrice 1-D de trois microbobines les stratégies d'émission-réception suivantes :

- E/R : une bobine E-R. Dans ce cas, le signal CF est en fait l'impédance de la bobine. Cette stratégie est très utilisée grâce à sa simplicité d'implémentation et malgré sa faible sensibilité.
- ER : une bobine E et une bobine R adjacente. Cette stratégie est la structure de base des sondes CF à fonctions séparées. La mesure est absolue et par conséquent assez sensible au décollement (lift-off) ou à l'inclinaison (tilt) de la sonde.
- RER : une bobine E située entre deux bobines R. Les deux bobines R sont câblées de façon à ce que les tensions soient soustraites l'une de l'autre : la mesure est différentielle.
- ERE+ : une bobine R située entre deux bobines E, connectées de façon à ce que les deux flux magnétiques induits s'additionnent au sein de la bobine centrale. Le signal mesuré est donc la superposition de deux signaux ER inversés, la mesure est donc absolue.
- ERE- : une bobine R située entre deux bobines E, connectées cette fois de façon à ce que les deux flux magnétiques induits se retranchent au sein de la bobine centrale. Cette stratégie peut être considérée comme différentielle, car le signal CF est censé être nul en absence de défaut, même si la différenciation intervient non pas dans la réception mais dans l'émission.

Ces cinq stratégies constituent toutes les possibilités utiles offertes par une matrice 1-D de trois microbobines adjacentes. Elles peuvent être considérées comme des structures élémentaires pour la conception d'une plus grande matrice, 1-D voire 2-D.



Les cinq stratégies d'émission-réception

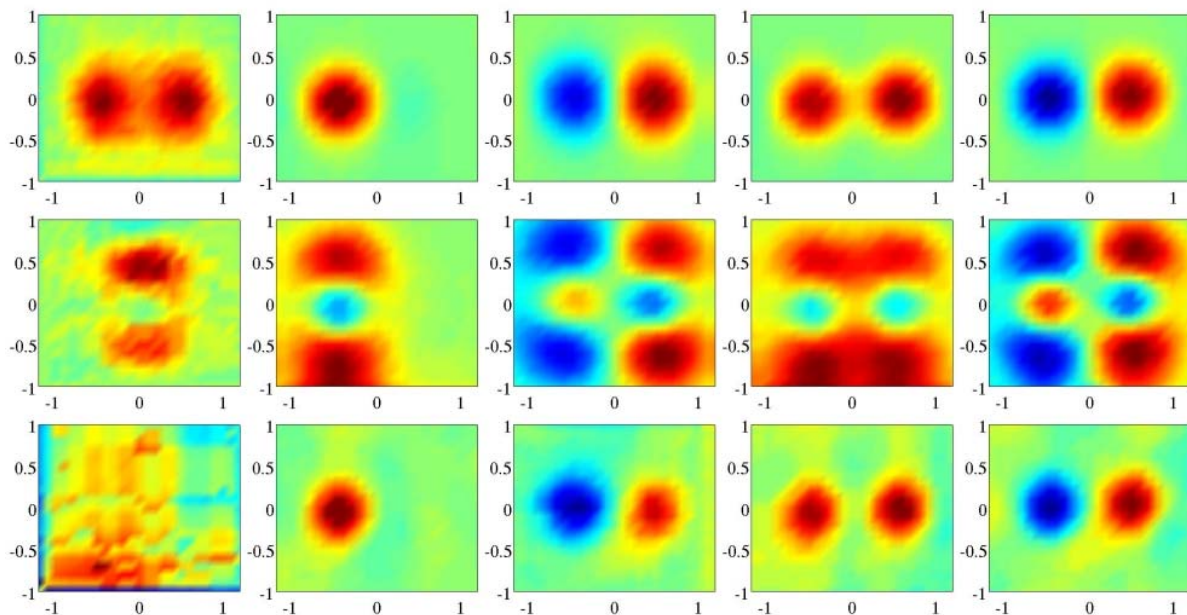
Mise en œuvre

La sonde matricielle a été mise en œuvre pour l'inspection exhaustive d'une pièce en alliage de nickel comportant 20 défauts rectilignes de surface, réalisés par décharge électromagnétique. Leur dimensions sont 0,1, 0,2, 0,4, 0,6 ou 0,8 mm en longueur, 0,1 mm en largeur et 0,1, 0,2 ou 0,4 mm en profondeur. Comme l'amplitude et la forme du signal CF dépendent énormément de l'orientation du défaut, tous les défauts sont disponibles dans les deux directions, parallèlement (cas le plus favorable) et perpendiculairement (cas le plus défavorable) à l'orientation principale de la matrice. Le matériau possède une perméabilité $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ et une conductivité $\sigma = 0.76 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$. Par exemple, la profondeur de peau à 8 MHz vaut $\delta = 0,20 \text{ mm}$.

Les mesures CF ont été réalisées par l'intermédiaire d'un impédancemètre HP4192A et d'un robot trois axes déplaçant la sonde. Tous deux sont contrôlés par un ordinateur qui acquiert simultanément les mesures. Comme la fréquence du courant d'émission est un facteur prédominant dans l'intensité des CF et la profondeur de pénétration (cf. Eq. 1), elle affecte fortement les performances de détection. Pour cette application, les fréquences CF utilisées ont été prises entre 1 MHz to 12 MHz.

RESULTATS DES ACQUISITIONS ET CALCUL DES RSB

La figure ci-dessous montre des images CF obtenues pour une fréquence de 8 MHz avec les 5 stratégies d'émission-réception. Les trois lignes montrent respectivement les images CF pour le plus grand défaut parallèle ($0,8 \times 0,1 \times 0,4 \text{ mm}^3$), le plus grand défaut perpendiculaire (mêmes dimensions) et le plus petit défaut ($0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$). Dans toutes ces images CF, la taille d'un pixel, qui correspond au pas d'échantillonnage spatial, est 0,1 mm.

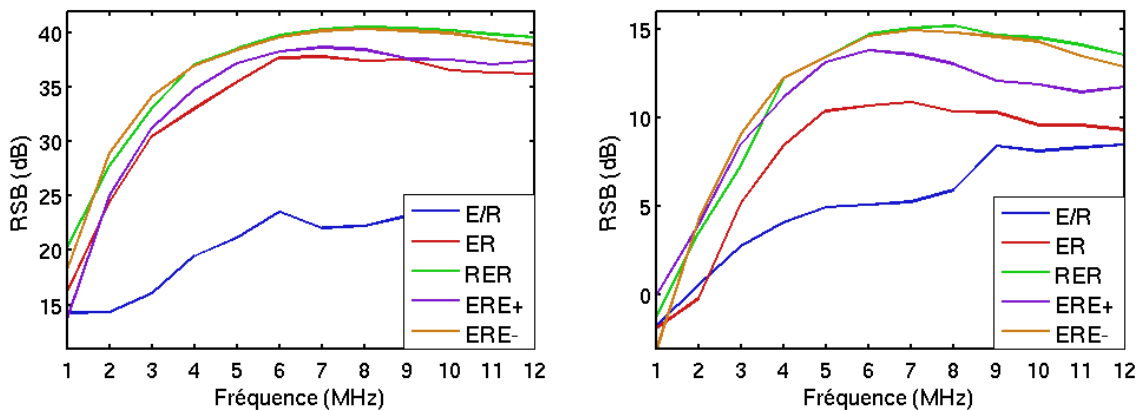


Images CF obtenues à 8 MHz pour le plus grand défaut parallèle ($0,8 \times 0,1 \times 0,4 \text{ mm}^3$, première ligne), le plus grand défaut perpendiculaire (mêmes dimensions, deuxième ligne) et le plus petit défaut ($0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$, troisième ligne) avec les cinq stratégies (de gauche à droite : E/R, ER, RER, ERE+, ERE-); les échelles sont en mm

L'efficacité de détection obtenue pour chaque image CF mesurée a été quantifiée par calcul du Rapport Signal sur Bruit (RSB). Les mesures ont été réalisées à la fois sur des zones contenant un défaut et sur des zones sans défaut. Le RSB est alors défini par

$$RSB = 10 \log \left(\frac{\sum_{k \in \text{defaut}} Z(x,y) - Z_{\text{moyen}}^2}{\sum_{k \in \text{hors-defaut}} Z(x,y) - Z_{\text{moyen}}^2} \cdot \frac{n_{\text{hors-defaut}}}{n_{k \in \text{defaut}}} \right)$$

où $Z(x,y)$ est le signal CF mesuré à la position (x,y) , Z_{moyen} est la moyenne de la valeur du signal CF en absence de défaut, n_{defaut} et $n_{\text{hors-defaut}}$ sont respectivement les nombres de pixels d'une zone avec et sans défaut. Le RSB dépend de la stratégie utilisée, de la fréquence des CF et évidemment des dimensions du défaut considéré. Les figures ci-dessous présentent le RSB en fonction de la fréquence pour chaque stratégie dans le cas du plus long défaut parallèle et du plus petit défaut.



Calcul du RSB pour les cinq stratégies d'émission-réception en fonction de la fréquence, dans le cas du plus long défaut parallèle ($0,8 \times 0,1 \times 0,4 \text{ mm}^3$) et du plus petit défaut ($0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$)

Les meilleurs résultats sont obtenus pour les stratégies RER et ERE-, qui permettent de détecter à 8 MHz le plus gros défaut avec un RSB de 40 dB et le plus petit défaut avec un RSB de 15 dB. Ces deux stratégies sont plus efficaces que les autres grâce à leur comportement différentiel, qui produit un signal mesurable uniquement en présence d'un défaut : les très petits défauts ($0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$) sont donc aussi détectables. Elles sont en réalité équivalentes en terme d'inductance mutuelle entre émission et réception, et produisent donc logiquement les mêmes résultats. L'implémentation de la stratégie ERE- est par conséquent suffisante pour détecter correctement ces défauts. La dernière partie de cette étude est réalisée uniquement à partir des mesures CF effectuées avec cette stratégie.

CARACTERISATION DE LA PERFORMANCE DE DETECTION DES DEFAUTS

Objectif

Les images CF précédentes sont des mesures de laboratoire, de bonne qualité grâce à un pas d'échantillonnage spatial dix fois plus petit que la taille des microbobines. Cependant, le temps d'acquisition assez important, dû aux déplacements répétés de la sonde, ne serait pas possible dans une mise en œuvre réelle : le pas d'échantillonnage spatial doit être augmenté. Par ailleurs, une sonde matricielle 2-D permet d'obtenir sans déplacement un pas spatial égal à la taille des microbobines (ici 1 mm).

Afin de simuler ce comportement, chaque image CF obtenue est décimée d'un point sur 10 et fournit ainsi 100 images décimées. La possibilité de détecter un défaut sur une image décimée dépend fortement de son positionnement par rapport à la position du défaut, et par conséquent le seul RSB ne suffit plus. Une analyse statistique des 100 images décimées est nécessaire pour prendre en compte toutes les possibilités de mauvais positionnement.

Caractéristiques Opérationnelles de Résultat

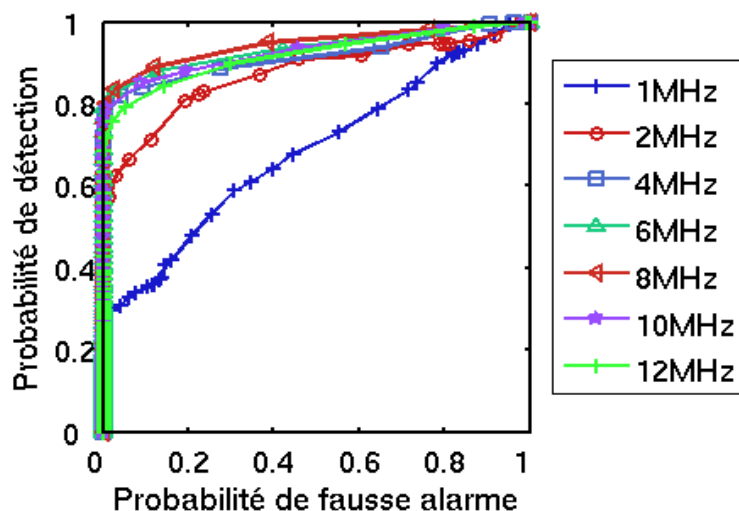
Une Caractéristique Opérationnelle de Résultat (COR) est une analyse statistique qui peut être calculée à partir d'un large jeu de mesures [9]. Un algorithme de détection doit être mis en place. Il détermine si, pour une valeur de seuil donnée, une image CF contient ou non une réponse de défaut. Alors, un jeu d'images CF qui correspondent à des zones comportant des défauts donne un taux de détection, que l'on peut considérer comme une Probabilité de Détection (PoD). La PoD varie en fonction de la valeur de seuil. Parallèlement, un jeu d'images CF correspondant à des zones sans défaut donne une Probabilité de Fausse Alarme (PFA). La courbe COR trace la PFA en fonction de la PoD pour les différentes valeurs de seuil.

Le point d'efficacité maximale d'un diagramme COR est (0,1) et correspond à aucune fausse alarme (PFA = 0) et les défauts détectés systématiquement (POD = 1). Si une courbe COR atteint ce point, cela signifie qu'au moins une valeur de seuil permet une détection optimale sans une seule fausse alarme. Une courbe COR peut être tracée pour chaque jeu de paramètres de mesure, comme la fréquence des CF ou le décollement sonde/cible. La distance minimale depuis chacune des différentes courbes COR au point d'efficacité maximale peut être utilisé comme comparaison entre ces courbes, et donc entre les paramètres correspondants.

Chaque courbe COR considère ici tous les 30 défauts (15 dimensions dans 2 orientations). Par conséquent, les valeurs de PoD sont indépendantes des dimensions et orientations des défauts, et concernent n'importe quel défaut de dimension équivalente. Le meilleur point d'une courbe, à savoir le plus proche du point d'efficacité maximale, correspond à la valeur optimale du seuil de détection. Cette valeur permet le meilleur compromis entre une PoD global élevée et une PFA global faible, indépendamment des considérations géométriques des défauts.

Influence de la fréquence des CF

La figure ci-dessous présente des courbes COR pour la stratégie ERE- à chaque fréquence des CF utilisée. Les meilleures courbes sont obtenues aux fréquences supérieures à 4 MHz, ce qui est en accord avec le précédent calcul de RSB réalisé sur les images non décimées. On remarque que la courbe de 1 MHz est assez proche de la bissectrice, qui est la limite de détection : la détection fiable de défauts à cette fréquence est quasiment impossible.



Courbes COR pour la stratégie ERE- et toutes les fréquences CF utilisées

Le tableau suivant donne pour toutes les fréquences la distance au point d'efficacité maximum, la PoD globale et la PFA globale. Il donne aussi la PoD particulière du plus long défaut parallèle et du plus petit défaut, c'est à dire la PoD calculée uniquement sur les images de chacun de ces défauts, avec la valeur optimale du seuil calculée globalement. Comme on l'a vu ci-dessus, les fréquences des CF supérieures à 4 MHz sont produisent les meilleurs résultats. Les valeurs optimales des PoD globales sont autour de 0,80, ce qui signifie que n'importe quel défaut peut être détecté dans ces conditions avec une probabilité de 80% (probabilité qui prend en compte le mauvais positionnement). Cette probabilité atteint cependant près de 100% pour un défaut long de $0,8 \times 0,1 \times 0,4 \text{ mm}^3$, contre seulement 70% pour un défaut de dimension $0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$.

Fréquence (MHz)	1	2	4	6	8	10	12
PoD globale	0,59	0,81	0,84	0,88	0,89	0,85	0,84
PFA globale	0,31	0,19	0,09	0,13	0,12	0,09	0,14
Distance au point d'efficacité maximale	0,51	0,27	0,19	0,18	0,16	0,18	0,21
PoD particulière du plus long défaut	1	0,98	0,99	0,99	1	1	0,99
PoD particulière du plus petit défaut	0,42	0,40	0,70	0,63	0,68	0,72	0,61

Données extraites des courbes COR obtenues avec la stratégie ERE- à différentes fréquences CF

CONCLUSION

Dans ce papier, une sonde matricielle de trois microbobines en ligne est étudiée. Les performances de cinq différentes stratégies de mesure sont comparées par calcul du RSB et la meilleure stratégie est déterminée. Tous les défauts, même ceux ne mesurant que $0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$, sont détectés avec un RSB supérieur à 15 dB. Les images CF sont ensuite décimées dans le but de simuler l'implémentation d'une sonde matricielle de plus grande taille et une analyse statistique des performances est menée grâce à des courbes COR. À 8 MHz, les plus longs défauts ($0,8 \times 0,1 \times 0,4 \text{ mm}^3$) sont toujours détectés et les plus petits ($0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}^3$) sont détectés dans 68% des cas. L'influence de la fréquence des CF est aussi statistiquement étudiée.

Les résultats obtenus sont très prometteurs et les travaux futurs se focaliseront sur l'utilisation de la stratégie ERE- dans différentes orientations au sein d'une sonde matricielle 2-D, dans le but de maximiser la sensibilité pour tous les types de défauts.

REFERENCES

- [1] P.-Y. Joubert et J. Pinassaud, Linear magneto-optic imager for non-destructive evaluation, *Sensors and Actuators A*, Vol. 129, 2006, pp. 126-130
- [2] L. Perez, C. Dolabdjian et L. Butin, Investigation in detection of fatigue cracks under rivet head airframe using improved GMR magnetometer in an Eddy Current System, *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 55, 2004, pp. 73-76
- [3] F. Vacher, C. Gilles-Pascaud, J.M. Decitre, C. Fermon et M. Pannetier, Non destructive testing with GMR magnetic sensor arrays, 9th European Conference on Non-Destructive Testing, Berlin, Germany, 2006
- [4] P.-Y. Joubert et Y. Le Bihan, Eddy Current data fusion for the enhancement of defect detection in complex metallic structures, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 19, 2004, pp. 647-651

- [5] T. Sollier, H. Schepens, B. Benoist et J. Reuchet, First Evaluation of the Set (Rotating Excitation) EC Probe Designed for Fast SG Tubing Inspection, 7th European Conference on Non-Destructive Testing, Copenhagen, Denmark, 1998
- [6] A.-L. Coutrot, E. Dufour-Gergam, E. Martincic, J.-P. Gilles, J.-P. Grandchamp, J.-M. Quemper, A. Bosseboeuf, F. Alves et B. Ahamada, Electromagnetic micro-device realized by electrochemical way, Sensors and actuators A, Vol. 91, 2001, pp. 80-84
- [7] M. Woytasik, J.-P. Grandchamp, E. Dufour-Gergam, E. Martincic, J.-P. Gilles, S. Megherbi, V. Lavalley et V. Mathet, Fabrication of planar and three-dimensional microcoils on flexible substrate, Microsystem Technologies, Vol. 12, 2006, pp. 973-978
- [8] H.L. Libby, Introduction to electromagnetic non-destructive test methods, Roberty Krieger Publishing company, New York, 1979
- [9] J.P. Egan, Signal detection theory and ROC analysis, Series in cognition and perception, Academic press, New York, 1975