

RÉCENTS DÉVELOPPEMENTS DE CAPTEURS MULTIÉLÉMENTS MAGNÉTIQUES

RECENT DEVELOPMENTS OF MULTIELEMENT MAGNETIC SENSORS

Decitre J.M., Marchand B., Casula O.
CEA/LIST – 91191 Gif-sur-Yvette
Tél. 01 69 08 32 66 – Fax. 01 69 08 75 97
E-mail : jean-marc.decitre@cea.fr

Résumé

Le principe du contrôle non destructif par courants de Foucault est bien adapté à la détection de petites entailles surfaciques dans des pièces métalliques. Cependant, l'utilisation d'une sonde possédant un seul élément sensible peut conduire à des temps de mesure très longs. Il est alors intéressant d'avoir recourt à des capteurs multiéléments. Dans le cas de surfaces plus complexes avec des rayons de courbures faibles jusqu'à quelques millimètres (comme c'est notamment le cas dans le secteur de l'aéronautique), le CEA-LIST possède des sondes multiéléments à partir de bobinages gravés sur des films flexibles en kapton. Ces sondes ont été optimisées par simulation. Pour inspecter des surfaces planes ou de grands rayons de courbure, le CEA-LIST développe également des sondes multiéléments dont les récepteurs sont des magnéto-résistances à effet géant (GMR). Compte-tenu de leurs faibles tailles, elles peuvent être alignées pour former une barrette de récepteurs et scanner une large zone avec une haute résolution spatiale. Il sera présenté un capteur GMR d'une vingtaine d'éléments et des sondes flexibles jusqu'à 128 éléments. Des résultats expérimentaux sur plusieurs types de défauts seront présentés.

Abstract

In Non Destructive Testing, Eddy Current principle turns out to be very efficient in the detection of very small surface breaking flaws that occur in metallic components. In most industrial applications, short inspection time is claimed and therefore multi-elements sensors probes are required. To go through those constraints, the CEA LIST has designed multi-elements EC probes based on two different technologies, depending on the application. The first one is based on micro-coils etched on a flexible kapton film. Optimized thanks to CIVA software, those probes are very efficient in the detection of defects located in complex geometries or in small curvature radius components (has it happens in aerospace industry for instance). The second one takes advantage of the small size and high sensitivity of giant magneto resistance (GMR) sensor. A 100 μ m spatial resolution array probe has been developed to detect very small defects (up to 50 μ m) in planar surfaces. This paper presents these two kinds of multi-elements probes: a 128 micro coils flexible array and a 22 GMR array. Experimental results on various mock-ups with different types of defects are shown.

INTRODUCTION

Le principe du contrôle non destructif par courants de Foucault est bien adapté à la détection d'entailles surfaciques dans des pièces métalliques. Pour de grandes surfaces à inspecter, comparées aux dimensions des défauts à détecter, il est intéressant d'avoir recours à des capteurs multiéléments afin de rendre les durées d'inspection compatibles des contraintes industrielles.

Dans le cas de surfaces complexes avec des rayons de courbures faibles jusqu'à quelques millimètres, le CEA-LIST possède des sondes multiéléments utilisant des bobinages gravés sur des films flexibles en kapton. Même en cas de variations du profil, l'entrefer reste quasi constant lors du déplacement de la sonde, ce qui assure un rapport signal à bruit particulièrement satisfaisant. De plus, le motif élémentaire a été optimisé par simulation afin d'être particulièrement sensible et également peu sensible aux variations d'entrefer.

Pour la détection de très petits défauts surfaciques sur des surfaces planes ou de grands rayons de courbure, le CEA-LIST développe en parallèle des sondes multiéléments constitués de capteurs magnétiques tels que magnétorésistances à effet géant (GMR). Compte-tenu de leur faible dimension, elles peuvent en effet être alignées pour former une barrette de récepteurs et scanner une zone avec une haute résolution spatiale.

Nous présentons dans une première partie des sondes multiéléments flexibles sur kapton optimisées par simulation, puis, dans une deuxième partie, une sonde multiéléments disposant d'une vingtaine de GMR.

SONDES MULTIELEMENTS FLEXIBLES SUR KAPTON

Introduction

Les sondes flexibles multiéléments sont particulièrement efficaces pour l'inspection de surfaces complexes qui peuvent présenter des rayons de courbure variables [1], jusqu'à quelques millimètres. Ce type de capteurs a initialement été développé pour des applications motoristes dans le secteur aéronautique, domaine dans lequel les défauts à détecter sont de l'ordre de quelques centaines de micromètres.

Conception du motif par simulation

Le logiciel CIVA [2] a été utilisé pour la conception du motif élémentaire du capteur, constitué de deux bobinages, l'un émetteur, l'autre récepteur. Les diamètres internes et externes, la distance entre l'émetteur et le récepteur et la fréquence ont été optimisés afin de conduire à un motif très sensible pour un défaut typique à détecter de quelques centaines de micromètres de longueur et permettant une bonne réjection du bruit d'entrefer lors du déplacement du capteur sur la pièce. La distance optimale conduit à un recouvrement du bobinage émetteur et du bobinage récepteur. Aussi, les 2 bobinages du motif sont disposés de part et d'autre du film kapton.

La figure 1 donne une comparaison entre les données simulées et les données expérimentales pour un défaut de 400 μ m de longueur.

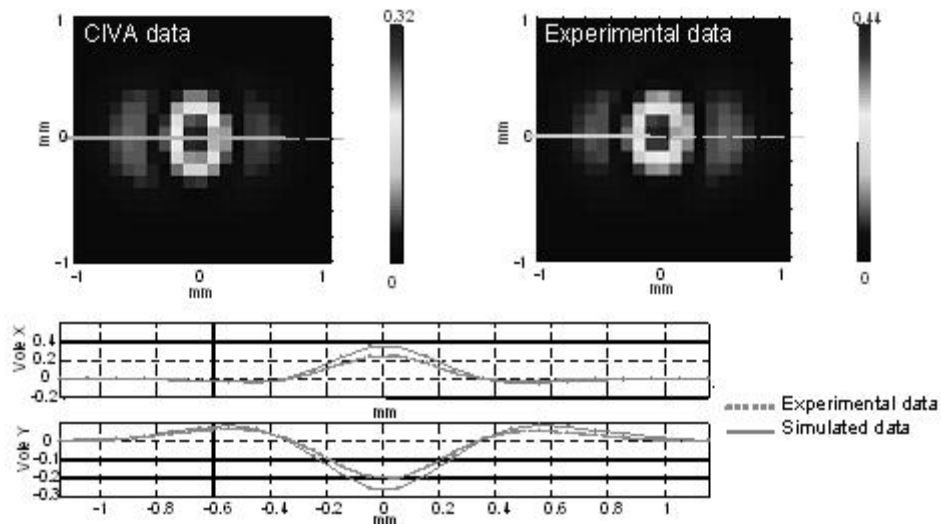


Figure 1 : Bonne adéquation entre les données simulées et les données expérimentales pour un défaut de 400µm de longueur (en haut : cartographie, en bas : coupe selon la ligne pointillée).

On constate la bonne adéquation entre les deux cartographies en termes de forme et d'amplitude.

Comparaison expérimentale entre le motif optimisé sur kapton et un bobinage classique

Il est intéressant de comparer les performances du nouveau motif sur kapton à celui d'un bobinage classique de 1mm de diamètre avec noyau en ferrite fonctionnant en mode fonctions communes, également utilisé pour la détection d'entailles de quelques centaines de micromètres de longueur.

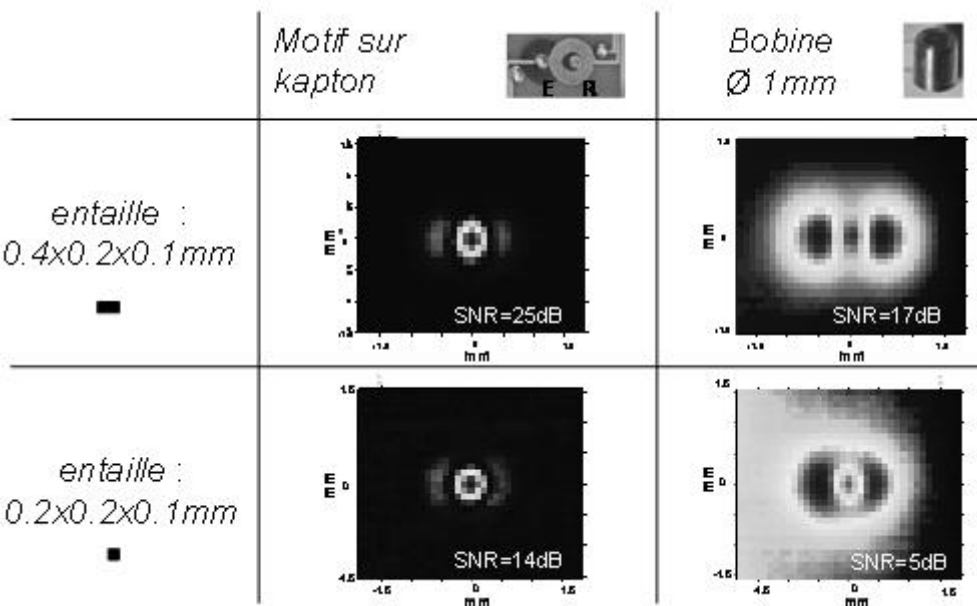


Figure 2 : Comparaison entre le motif optimisé sur kapton et un bobinage classique.

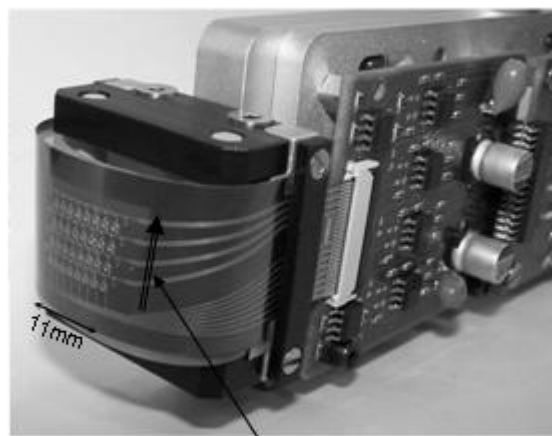
La figure 2 donne les résultats d'acquisitions expérimentales entre les deux capteurs pour deux défauts de 400µm et 200µm de longueur. Malgré le très faible nombre de spires, il est

obtenu un meilleur rapport signal à bruit avec le capteur sur kapton. Ce résultat s'explique notamment par le fait que ce dernier a été optimisé afin d'être moins sensible aux variations d'entrefer qu'un bobinage en mode fonctions communes.

De plus, la résolution spatiale est bien meilleure avec le capteur sur kapton ce qui présente l'avantage de pouvoir obtenir une localisation précise et une estimation des dimensions des défauts.

Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux suivants ont été obtenus avec une sonde disposant de 32 motifs identiques, soit 64 bobinages de quelques spires chacun. Tous les bobinages émetteurs sont situés sur une même face du kapton, ceux récepteurs sur l'autre face. Le pas entre les différents motifs est de $350\mu\text{m}$ et il est possible d'inspecter une bande de 11 mm de large. Compte-tenu de l'encombrement d'un motif, ceux-ci sont disposés en quinconce sur 4 lignes. La figure 3 donne une photo du capteur avec son électronique associée comprenant des préamplificateurs positionnés à proximité des bobinages afin d'augmenter le rapport signal à bruit.



Direction de déplacement du capteur
Figure 3 : Capteur flexible multiéléments disposant de 32 motifs.

Sur la photo figure 4, on visualise le capteur 32 motifs interfacé avec le nouvel appareil Courants de Foucault MultiXCF développé en collaboration avec la société M2M. Doté de 32 voies émettrices indépendantes multi-fréquences et 64 démodulateurs numériques parallèles indépendants (une extension à 128 démodulateurs indépendants est en cours), cet appareil est capable de piloter des capteurs multiéléments disposant d'un grand nombre de voies. Il permet également de configurer des contextes temporels.

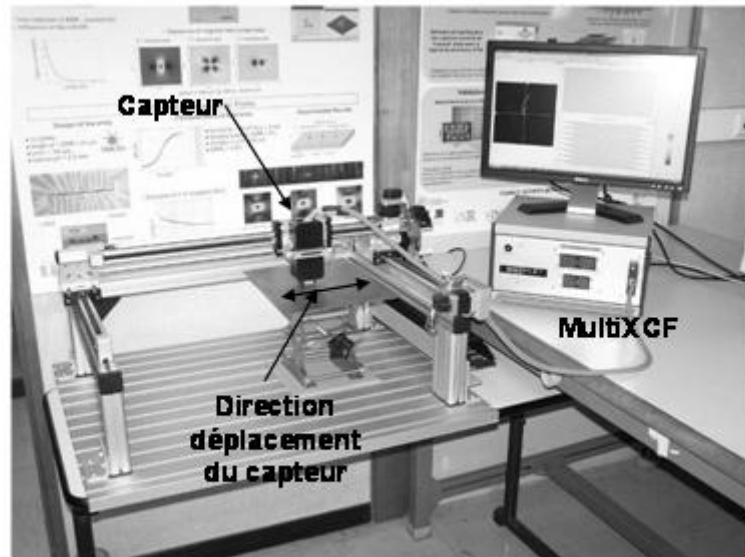


Figure 4 : Dispositif expérimental mettant en œuvre le capteur 32 motifs et le nouvel appareil MultiXCF de M2M.

La dispersion entre motifs a été mesurée et est inférieure à 10% ce qui traduit une bonne maîtrise du procédé de fabrication du kapton.

La figure 5 donne une acquisition avec le capteur 32 motifs sur un défaut de 4 mm de longueur, disposé perpendiculairement par rapport à la direction de déplacement. L'interface permet de configurer l'affichage et de choisir diverses représentations des données. Ainsi, par exemple, sur la figure 5, il est représenté :

- à gauche : les 32 courbes de Lissajous superposées dans le plan d'impédance (une courbe par motif),
- en haut, à droite : une cartographie dont les données sont acquises sur un déclenchement de type codeur temps. Dans ce cas, en raison de la mise en quinconce des motifs selon 4 lignes (voir figure 3), la signature de l'entaille apparaît discontinue.
- en bas, à droite : le CSCAN dont les données sont acquises sur un déclenchement de type codeur position. Dans ce cas, la description du capteur incluant les positions des différents éléments permet d'obtenir un CSCAN de la surface et d'avoir une signature non discontinue de l'entaille.

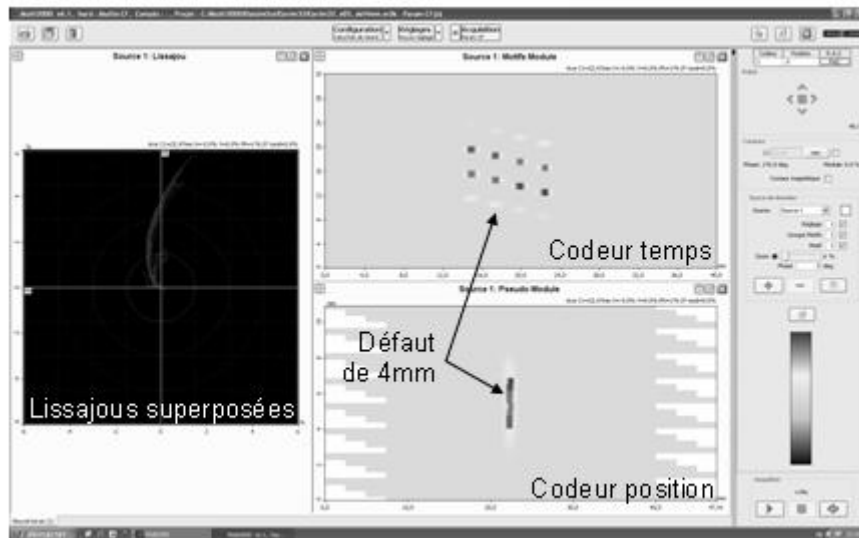


Figure 5 : Acquisition sur un défaut de 4 mm.

La figure 6 donne une autre acquisition sur un défaut plus petit, de 400µm de longueur. Le défaut est parfaitement détecté.

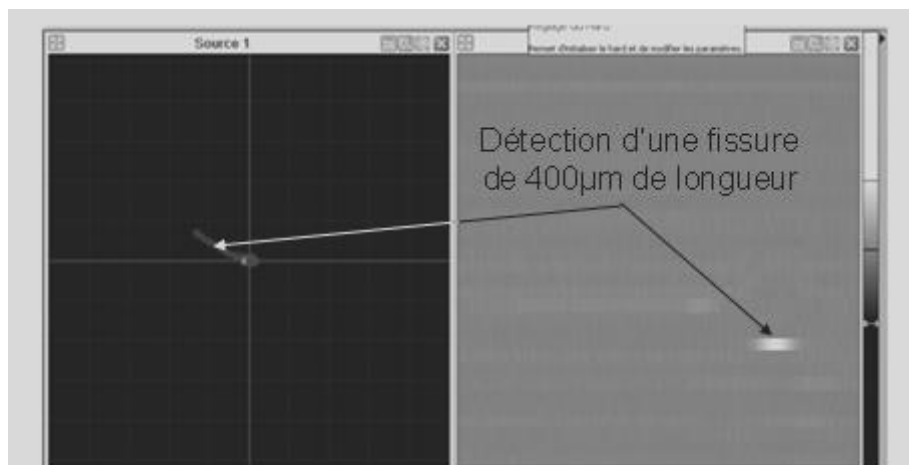


Figure 6 : Détection d'une entaille de 400µm de longueur.

Bilan et sondes en cours de développement

Les capteurs flexibles sur kapton sont particulièrement bien adaptés à la détection de défauts surfaciques de quelques centaines de micromètres, y compris localisés dans des surfaces complexes (notamment de rayon de courbure variable). Le procédé de fabrication est fiable, si bien que les capteurs multiéléments présentent peu de dispersions entre motifs.

D'autres sondes disposant de plus de bobinages sont en cours de développement. La figure 7 donne l'exemple d'une sonde de 128 motifs (soit 256 bobinages) permettant de couvrir une bande de 70 mm de large en une seule passe.



Figure 7 : Nouvelle sonde 128 motifs.

Cette sonde est également pilotée par l'appareil MultiXCF commercialisé par la société M2M.

CAPTEURS MULTIELEMENTS MAGNETIQUES

Introduction

Les capteurs magnétiques (tels que les GMR) peuvent avoir des surfaces actives aussi petites de quelques dizaines de micromètres [3] [4]. Ramenée à l'encombrement, leur sensibilité est très élevée par rapport à celle des bobinages, ce qui en fait des capteurs très intéressants pour la réalisation de sondes en CND par courants de Foucault. Aussi, le CEA-LIST a-t-il développé des capteurs multiéléments à base d'éléments magnétiques, notamment avec la réalisation d'une GMR 22 éléments.

Capteur GMR 22 éléments

A partir du design d'un capteur monoélément optimisé, il a été conçu une GMR disposant de 22 éléments avec un pas entre éléments de $100\mu\text{m}$ (en réalité deux GMR de 11 éléments disposées tête bêche). Compte-tenu des pistes de connexion, la longueur des zones actives est de $80\mu\text{m}$. La figure 8 donne une photo du capteur. Il permet de couvrir une bande de 2.2 mm de largeur.

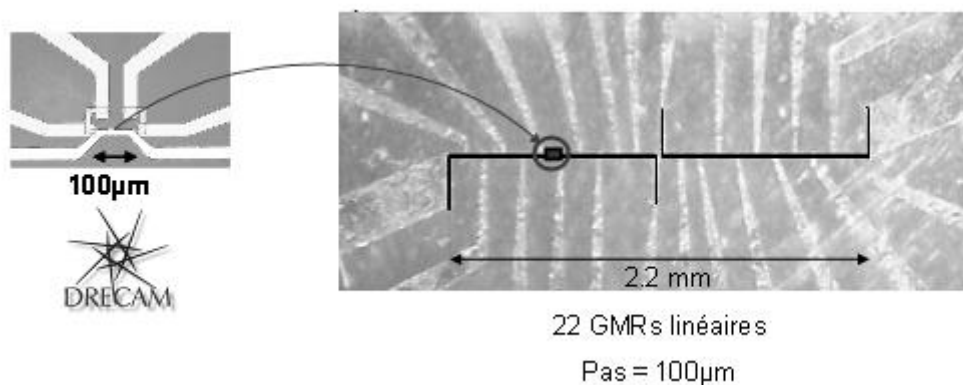


Figure 8 : GMR 22 éléments.

La figure 9 montre que la dispersion de sensibilité entre GMR au sein d'une même barrette est faible (inférieure à 5%).

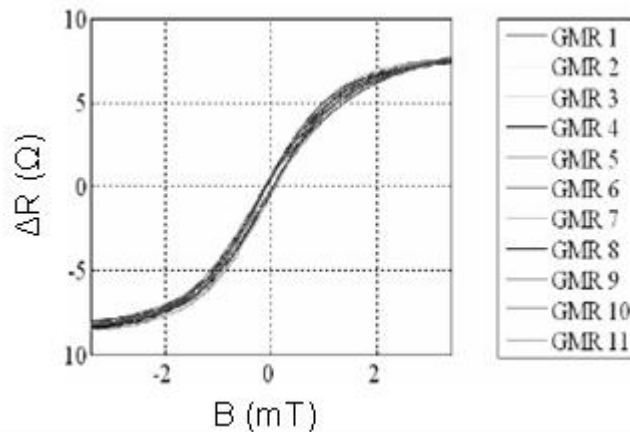


Figure 9 : La dispersion entre les sensibilités des GMR est faible.

La figure 10 donne le résultat expérimental sur trois très petits défauts dont le plus petit est un cube de 100 μm de côté en surface. On constate que tous les défauts sont parfaitement détectés avec un rapport signal à bruit très satisfaisant. Un défaut cubique de 50 μm de côté a également été détecté.

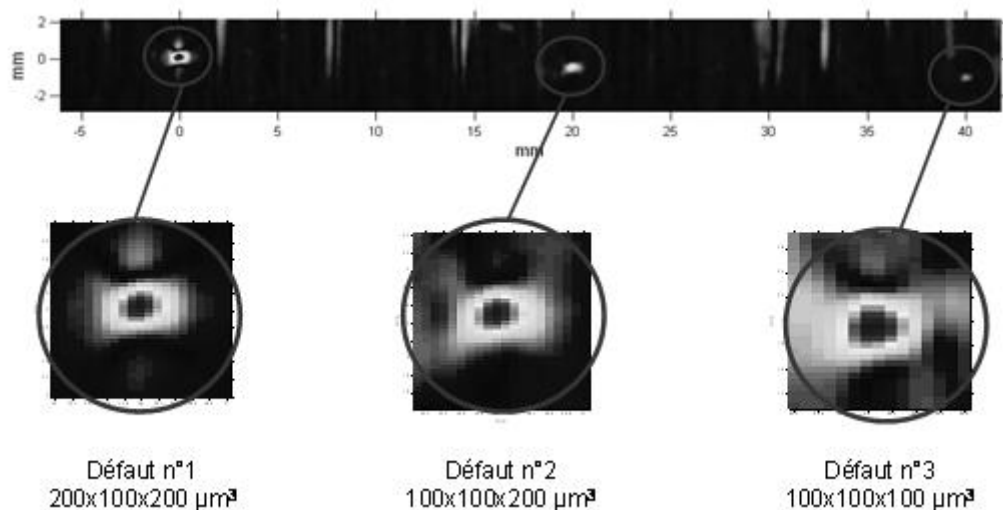


Figure 10 : Acquisition sur différents petits défauts.

La mise en œuvre de cette GMR multiéléments avec l'appareil MultiXCF est en cours.

Développement en cours

Etant donné les bons résultats obtenus avec ces capteurs magnétiques, une barrette de magnétorésistances à effet transverse est en cours de réalisation dans le cadre du projet PNANO nommé IMAGINE. Cette nouvelle sonde disposera d'une centaine d'éléments et d'une résolution spatiale de l'ordre de 200 μm . D'autres sondes basées sur d'autres technologies de senseurs magnétiques tels que les GMI et les μ fluxgates sont aussi à l'étude.

CONCLUSION

Les capteurs flexibles multiéléments sur kapton présentent de très bonnes performances. Le motif optimisé grâce au logiciel CIVA permet d'obtenir une grande sensibilité et un rapport signal à bruit très satisfaisant dans la mesure où le bruit dû aux variations d'entrefer est minimisé. De plus, la haute résolution spatiale permet de localiser précisément les défauts. L'association du kapton, avec un rouleau de silicone flexible est très bien adaptée aux géométries complexes. Aucune perte significative de niveau du signal n'est constatée entre une pièce plane et une surface cylindrique présentant un rayon de courbure de quelques millimètres de rayon. Les procédés de fabrication industriels sont fiables et conduisent à peu de dispersions des motifs entre eux. Le CEA-LIST met au point des capteurs disposant de plus de motifs et dont les motifs peuvent être modifiés en fonction de l'application et des défauts à détecter.

La bonne sensibilité et la petite dimension des capteurs magnétiques GMR confèrent aux capteurs GMR un intérêt particulier dans les applications de contrôles non destructifs par courants de Foucault. Ainsi, une sonde constituée de 22 éléments de 100 μm de résolution spatiale permet de détecter correctement un défaut de 50 μm . Elle sera prochainement pilotée par l'appareil multivoies MultiXCF commercialisé par la société M2M, comme le seront d'autres capteurs multiéléments magnétiques en cours de réalisation.

Références bibliographiques

- [1] Gilles-Pascaud C., Vacher F., Decitre JM., Cattiaux G., « Eddy Current Array Probe Development For Complex Geometries », 5th ICNDE, San Diego, July 2006.
- [2] <http://www-civa.cea.fr>
- [3] Dogaru T. and Smith S. T., "Giant Magnetoresistance-Based Eddy-Current Sensor", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 4, pp.2790-2793, July 2001.
- [4] Marchand B., Vacher F., Decitre JM., Gilles-Pascaud C., Fermon C. « High Resolution Eddy Current Probes For Non Destructive Testing », QNDE 2007, Golden, July 2007.