



HAL
open science

Etat de l'art du développement des contrôles non destructifs par des méthodes électromagnétiques à l'aide de magnétomètre à haute sensibilité

Rimond Hamia, Christophe Cordier, Sébastien Saez, Christophe Dolabdjian

► To cite this version:

Rimond Hamia, Christophe Cordier, Sébastien Saez, Christophe Dolabdjian. Etat de l'art du développement des contrôles non destructifs par des méthodes électromagnétiques à l'aide de magnétomètre à haute sensibilité. The e-Journal

Database of Nondestructive Testing (NDT.net), 2009, France. hal-00987188

HAL Id: hal-00987188

<https://hal.science/hal-00987188>

Submitted on 5 May 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉTAT DE L'ART DU DÉVELOPPEMENT DES CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS PAR DES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES À L'AIDE DE MAGNÉTOMÈTRE À HAUTE SENSIBILITÉ

STATE OF THE ART OF EDDY CURRENT NON-DESTRUCTIVE TESTING BY USING HIGH SENSITIVITY MAGNETOMETERS

R. HAMIA, C. CORDIER, S. SAEZ, C. DOLABDJIAN
GREYC CNRS UMR6072 – ENSICAEN - UCBN
6, Bd du Maréchal Juin 14050 CAEN Cedex
Tél. 02 31 45 26 95 - Fax. 02 31 45 26 98
E-mail : C.Dolabdjian@greyc.ensicaen.fr

Résumé

Ces dernières années, les performances des capteurs magnétiques à haute sensibilité ont considérablement évoluées. Ces senseurs offrent de nouvelles perspectives en terme d'applications en Contrôle Non Destructif (CND) par la mesure magnétique à simple ou à multiples capteurs. Par ailleurs, la souplesse de mise en oeuvre de ces systèmes, leurs performances intrinsèques, telles que la dynamique de détection, le bruit et la bande passante, ouvre la voie à des nouvelles géométries d'inducteurs et de détecteurs permettant notamment le balayage de surfaces complexes et importantes.

L'objet de cette communication est de présenter l'état de l'art des méthodes de mesure d'induction locale utilisées ou utilisables en CND. Cet article s'appuie sur des travaux de recherches publiés ces dernières années et des travaux effectués au sein de l'équipe électronique du Groupe de Recherche en Informatique, Image, automatique et Instrumentation de CAEN (GREYC).

During the past years, high sensitivity magnetic sensor performances have significantly advanced. Sensors offered new Non-Destructive Testing or Inspection (NDT or NDI) application prospects by using one or multiple sensors. Magnetic sensor simplicity, intrinsic sensor performances, like dynamic range, noise and bandwidth, offered new possibilities in sensor and inducer geometry which permit to scan large or complex surfaces.

Main objectives of this article are to present the state of the art of NDT or NDI magnetic measurement method of recent published researches and developments and works made in the Electronic Team of the research group of Informatic, Image, Automatic and Instrumentation of CAEN (GREYC).

Introduction

Bon nombre de capteurs magnétiques dits à haute sensibilité existent actuellement. Nous rappellerons tout d'abord les différentes familles de capteurs et préciserons leurs principales performances. Cet article n'a pas pour but de détailler le fonctionnement de ces derniers [1] mais de présenter succinctement les différentes technologies utilisées ou utilisables dans le cadre d'applications de CND dans un milieu compatible avec une problématique industrielle. Usuellement, les capteurs magnétiques permettent de mesurer une induction locale. Pour présenter l'état de l'art des développements actuels, nous reprendrons ici une terminologie usitée qui permet de classer les différents modes de mise en oeuvre de ces sondes [2] :

- **MIL/R** Mesure d'Induction Locale Rémanente,
- **MIL/EC** Mesure d'Induction Locale en Excitation Continue,
- **MIL/EA** Mesure d'Induction Locale en Excitation Alternative,
- **MIL/EP** Mesure d'Induction Locale en Excitation Pulsée.

Généralement, les caractérisations présentées sont obtenus en laboratoire sur des pièces d'essai et mettent en œuvre deux modes classiques de mesure de l'induction magnétique correspondant respectivement à une mesure absolue à l'aide d'un magnétomètre ou à une mesure différentielle à l'aide d'un gradiomètre.

Nous poursuivrons cette revue par la présentation des tendances qui se font jour et détaillerons plus particulièrement celles utilisées dans le domaine de la détection et de l'évaluation des défauts sous-jacents dans des pièces massives, de forte conductivité électrique ou de forte perméabilité magnétique. L'apport de ces techniques apparaît d'autant plus pertinent pour des profondeurs de pénétration importantes des courants induits, ces derniers, ne pouvant plus être détectés par des moyens conventionnels, ou lorsque la capture des signaux utiles n'apparaît pas dans un schéma conventionnel simple, tel que celui d'un émetteur-récepteur à bobines couplées. Deux conditions importantes sont à priori à satisfaire pour atteindre cet objectif de détection de défauts à de forte profondeur :

- créer une induction très élevée, au mieux, dans toute la section de la pièce à contrôler et, à minima, à la profondeur du défaut recherché,
- positionner l'élément de mesure de telle sorte qu'il soit influencé le plus possible par la perturbation des courants induits, provoquée par la présence du défaut, sans pour autant être influencé par la géométrie de la pièce ou plus généralement de tout phénomène électromagnétique susceptible d'influencer ou perturber la mesure.

Les principaux capteurs

Si l'on s'intéresse à la mesure de l'induction locale ou d'un champ magnétique en CND, il est primordial d'avoir une sensibilité intrinsèque du senseur compatible avec les applications envisagées. Il existe un certain nombre de technologies de capteurs qui ont un fort potentiel et de très bonnes performances.

Capteurs	b_n (pT/√Hz @ 1 Hz)	b_n (en zone de bruit blanc)	Volume (mm ³)	Type d'alimentation
SQUID [3, 4]	0,01-0,1	10-100 fT/(√Hz)	1000	Secteur
Fluxgate [5, 6]	10	qq. pT/(√Hz)	1000	Batterie
Hall [7]	30,000	qq. 10 nT/(√Hz)	0,001	Batterie
MagnétoRésistance [8]	200	qq. 10 pT/(√Hz)	0,001-2	Batterie
Hybride (MR/Supra) [9]	0,032	qq. 10 fT/(√Hz)	100	Secteur
MagnétoImpédance [10]	100-1000	qq. pT/(√Hz)	0,01	Batterie
MagnétoElectrique [11]	1000	qq. 1-10 pT/(√Hz)	1	Batterie

Tableau 1 : Présentation de quelques caractéristiques des principaux capteurs magnétiques à haute sensibilité utilisés ou utilisables en CND.

Néanmoins, l'implémentation de ces derniers s'étudie au regard d'un bon nombre de paramètres qui peuvent se décliner au niveau de l'élément sensible par : le niveau de bruit

intrinsèque, la linéarité, la sensibilité, la bande passante, la dynamique, la consommation, la taille, le prix, la robustesse, la facilité de mise en oeuvre, etc...

Très généralement, les capteurs magnétiques, éléments fortement non-linéaires, devront être conditionnés au mieux pour disposer non pas d'un simple élément sensible à l'induction magnétique mais de réels magnétomètres ou gradiomètres. En effet, les conditions classiques d'utilisation de tels systèmes en CND imposent des contraintes, notamment en terme de dynamique, qui ne peuvent être supportées que par des systèmes robustes, à grande dynamique et fortement linéaires [12]. Il est à noter que seules les sondes de Hall peuvent être utilisées directement comme de simples magnétomètres. Pour les autres capteurs, ils fonctionnent quasiment tous, dans un mode de contre réaction en champ ou en flux, permettant ainsi de la linéarisation de leur fonction de transfert. Le tableau 1 présente un certain nombre de technologies de capteurs. Ils se déclinent en 4 principales familles pour lesquelles les principaux effets physiques mis en jeu sont liés à des phénomènes inductifs, de mobilité électronique, de quantification de flux et de résonance de spin.

Les performances de ces capteurs doivent être comparées avec prudence. En effet, il existe un certain nombre de facteurs de mérite permettant de les classer, notamment en terme de bruit magnétique équivalent, de résolution spatiale [13] ou de volume effectif [14]. Néanmoins, la problématique industrielle engendre parfois une certaine occultation de ces analyses pour des critères plus pragmatiques liés notamment à des problèmes de ruptures technologies ou de pérennité des systèmes développés.

Malgré cela, nous pouvons comparer, dans une certaine mesure, ces différentes technologies. Les magnétomètres à SQUID restent prohibitifs et complexes pour le développement de système de CND industriel. Les Flux-gates offrent, contrairement au SQUID, une simplicité d'utilisation et de mise en oeuvre. Cependant, cette technologie reste encore très onéreuse. Les récents travaux sur les sondes de Hall montrent que ces capteurs offrent des performances intéressantes, mais qu'ils souffrent toujours d'une densité spectrale de bruit équivalent en champ de 2 à 4 ordres de grandeur supérieure aux autres technologies. Les dispositifs à base de magnétorésistance sont en plein essor. Ils restent très performants et simples d'emploi si la technologie de réalisation de magnétomètres "reproductibles" est bien maîtrisée. Actuellement, de nouveaux dispositifs à base de magnétoimpédance voient le jour. Ces derniers devraient pouvoir concurrencer les dispositifs de type magnétorésistif en terme de coût et de performances. D'autres, tels que des dispositifs à effet magnétoélectrique, émergent.

Le principal avantage des magnétomètres par rapport aux bobines conventionnelles est qu'ils offrent une évolution du rapport signal à bruit maximal, ou dynamique, plus favorable pour les très basses et très hautes fréquences d'excitation. En effet, l'évaluation ce rapport, dans un Hertz de bande passante, pour une bobine circulaire peut être donné par :

$$RSB_{max} \approx \frac{\left(\text{Min} \left(r^2 f B_0, V_{CC}, V_{CC} \frac{r_0^2 f_0}{r^2 f} \right) \right)}{\left(\text{Max} \left(e_n(f), \sqrt{4k_B T \frac{2\pi N}{r}}, r^2 f b_{n_ext}(f) \right) \right)}_{dB} \approx 80-120 \text{ dB}$$

où r , N , f , B_0 , V_{CC} , $e_n(f)$, $b_{n_ext}(f)$ sont, respectivement, le rayon de la bobine, son nombre de spire, la fréquence d'excitation, l'amplitude maximale de l'induction locale induite, la tension d'alimentation, la densité spectrale de bruit en tension vue avant amplification, la densité spectrale de bruit équivalent en champ de l'environnement de la mesure. r_0 , f_0 , sont des termes de normalisation.

Dans les cas, des magnétomètres, ce rapport signal à bruit maximal, dans un Hertz de bande passante, est donnée par :

$$RSB_{max} \approx \frac{V_{cc}}{S_r \sqrt{b_n^2(f) + b_{n_ext}^2(f)}} \approx 80 - 160 \text{ dB}$$

où S_r est la sensibilité du magnétomètre et $b_n(f)$ est la densité spectrale de bruit équivalent en champ à la fréquence d'excitation, f . Un exemple de variation de ces RSB_{max} est donné en figure 1.

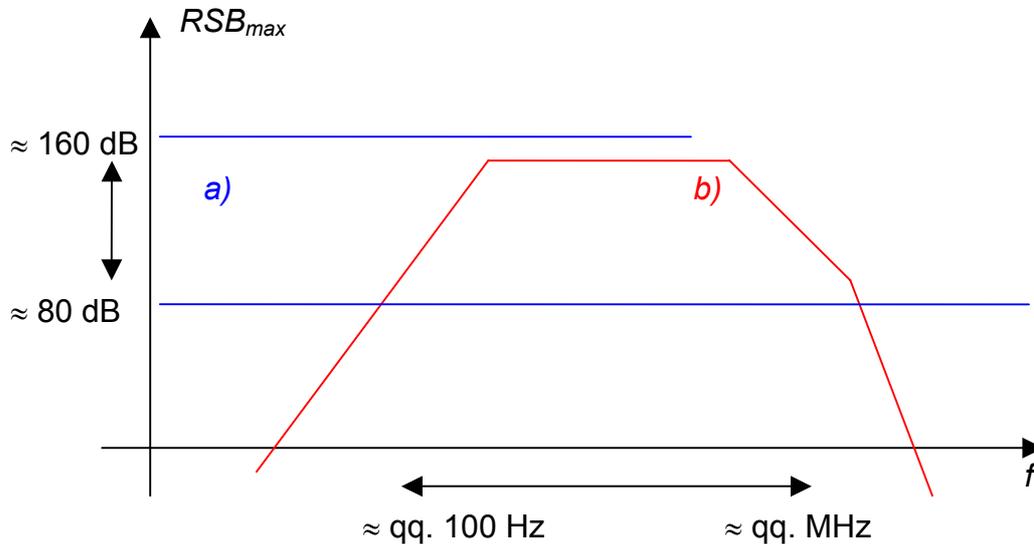


Figure 1 : Evolution du rapport signal à bruit maximal en fonction de la fréquence de travail pour une bobine a) et un magnétomètre b)

Des exemples d'applications

Il existe un bon nombre d'articles faisant référence à l'utilisation de capteurs magnétiques à haute sensibilité pour le CND. Les démonstrateurs présentés mettent en œuvre les principaux types de capteurs décrits dans le paragraphe précédent, au travers des différents modes de mesure de l'induction locale (R/EC/EA/EP).

Nous présenterons et analyserons ci-après quelques uns de ces développements. Puis, nous montrerons des exemples de résultats obtenus à partir de capteurs spécifiques développés au laboratoire GREYC et faisant appel à la mesure de l'induction locale au moyen de composants magnétorésistifs.

Mesure d'induction locale Rémanente

Dans le cadre de la mesure de l'IL/R, il existe un certain nombre d'exemples [15] mettant en œuvre des capteurs magnétiques telles que des sondes de Hall ou des magnétorésistances. Ces magnétomètres trouvent ici pleinement leur intérêt puisqu'ils offrent la possibilité et l'avantage de mesurer aisément les 3 composantes spatiales du champ quasi-statique à l'aplomb des surfaces observées. Un certain nombre de résultats avait été présenté lors de la précédente édition des journées COFREND à Beaume [1]. Les auteurs y mentionnaient différents types de caractérisations obtenues par cette méthode en comparaison à un système de contrôle magnétoscopique classique. Le point clef de ces mesures est la dynamique des sondes associées aux systèmes d'acquisition qui doit permettre de discriminer de très faibles variations de l'induction locale induite par les défauts devant de fortes variations de l'induction locale induite par l'inhomogénéité du matériau, telles que des variations d'épaisseur ou de perméabilité. Dans ce cadre, l'utilisation de structures gradiométriques est pleinement justifiée.

Mesure d'induction locale en Excitation Continue

Comme dans le cas décrit précédemment, les capteurs magnétiques offrent tous les avantages pour la mesure d'IL/EC. Il existe un certain nombre de travaux décrivant ce type de caractérisation. Un exemple récent, développé par W.Sharatchandra Singh *et al.*, met en œuvre des sondes GMR pour la caractérisation de défaut dans un acier ordinaire [16]. Ils démontrent la bonne adéquation entre les résultats observés et les attentes théoriques pour la détection de défauts apparaissant à plus de 10 mm de la surface de l'échantillon inspecté. La figure 1 présente la chaîne de mesure qui met en œuvre une culasse de magnétisation et un élément sensible pour la mesure de ce qui est usuellement nommé "flux de fuite". Des travaux plus anciens ont été présentés en 2001. Ils mettent en œuvre un système à SQUID associé à des sondes de hall et des MR. Ces résultats montraient la détection de rupture de fer à béton dans des structures en béton armé de ponts [17].

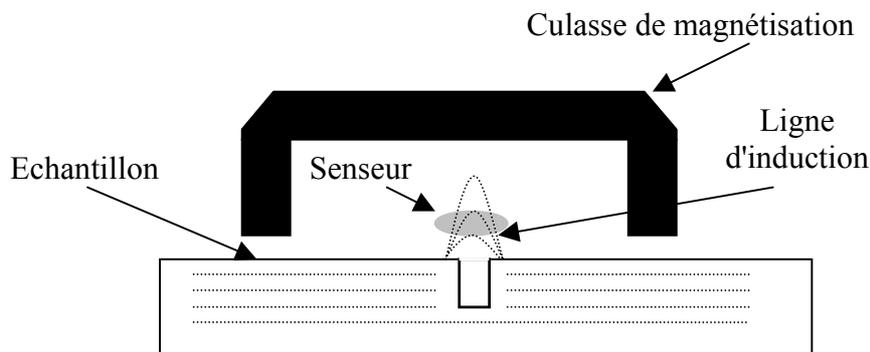


Figure 2 : Principe de la mesure de l'induction locale en excitation continue

Mesure d'induction locale en Excitation Alternative

La mesure de l'IL/EA est une méthode beaucoup plus classique. Elle met en œuvre des moyens conventionnels, en terme d'excitation, de balayage, de traitement du signal et d'observation des signatures des défauts. Seul l'élément sensible diffère par l'utilisation, non plus d'une bobine de détection, mais d'un magnétomètre. Un schéma de principe est donné en figure 3. Généralement, les sondes à base de capteurs magnétiques sont très facilement interfaçables aux systèmes conventionnels de détection, tels que les defectoscopes.

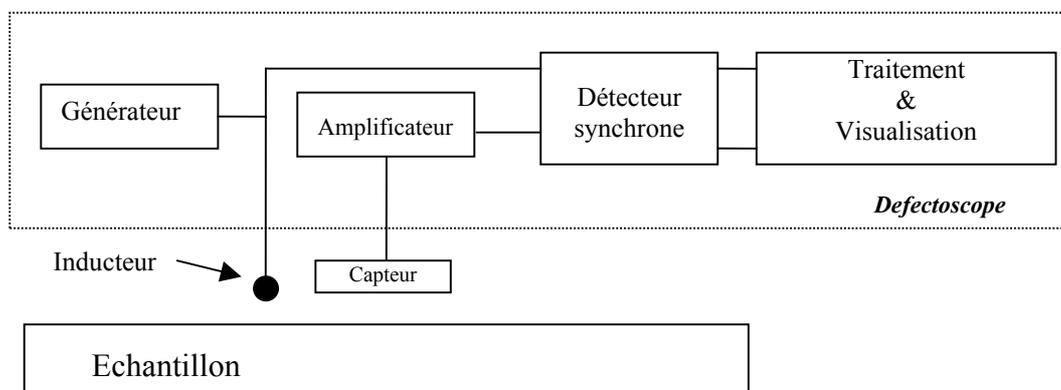


Figure 3 : Exemple d'un banc de caractérisation pour la mesure de l'induction locale en excitation alternative

Nous pouvons noter que dans cette structure, et comme le montre la figure 1, l'inducteur et le magnétomètre peuvent être fortement découplés offrant ainsi une très forte flexibilité de

mise en œuvre en terme de géométrie et d'espace. Cette souplesse de réalisation permet alors d'engendrer de nouveaux "design" de sondes, totalement irréalisables à l'aide des méthodes conventionnelles.

Il existe un bon nombre de réalisations mettant en œuvre des capteurs de type fluxgate, SQUID ou GMR. Nous pouvons lister un certain nombre d'avantages mis en avant, dans le cadre de ces mesures au regard des performances des chaînes de détection :

- caractérisation de défauts profonds (à plus de 10 mm de la surface) [18, 19],
- caractérisation de défauts pour des "lift-off" important de la sonde (qq. 10 de mm) [20],
- vitesse rapide de balayage (pour la détection de défauts profonds) [21],
- observation de défauts dans des matériaux composites [22],
- observation de μ -défauts de surface [23, 22],
- matrice de capteurs [24, 25],
- système d'imagerie à multiples capteurs [25, 26, 27],
- forte dynamique et linéarité des chaînes d'acquisition [28, 25].

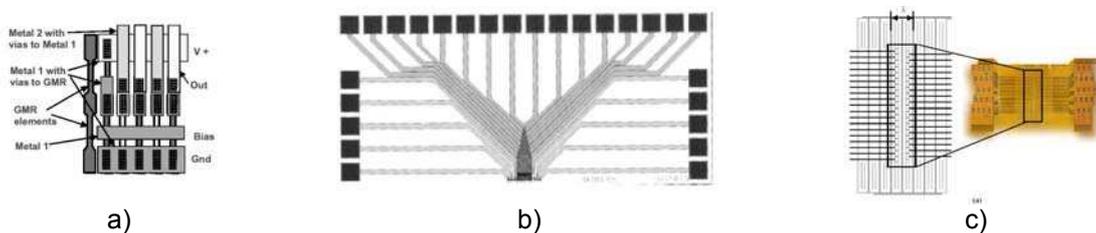


Figure 3 : Exemples de structures à μ -capteurs à base de Magnétorésistances, schéma de principe a), matrice de 16 éléments (espacés d'environ 15 μm) b) et matrices souples c) [29, 30, 31]

L'ensemble des résultats obtenus à l'aide de ces démonstrateurs doit être considéré avec prudence. En effet, ils montrent souvent les performances de systèmes dans des conditions expérimentales particulières, sans réelles critiques et analyses de la problématique. Or, la mesure d'une induction locale, au regard des performances des capteurs utilisés, n'est pas un problème simple et doit être traitée avec rigueur. Peu de résultats présentent, au minimum, l'amplitude de l'induction locale mesurée en fonction de la densité des courants de l'induit, du bruit magnétique environnemental, des dynamiques requises, de la résolution spatiale, etc... Pourtant, une analyse judicieuse d'un bon nombre de paramètres permettrait dans une certaine mesure de qualifier les performances réelles des systèmes présentés au regard notamment des performances des capteurs utilisés et des méthodes conventionnelles.

Mesure d'induction locale en Excitation Pulsée

La mesure de l'IL/EP est moins usitée car plus complexe à mettre en œuvre. Elle consiste dans la mesure de la décroissance de l'induction locale après l'application d'un pulse d'induction en champ. Il existe un certain nombre d'exemples, mettant en œuvre des magnétomètres ou des gradiomètres à haute sensibilité, décrivant les performances de tels systèmes. Ils utilisent des magnétorésistances ou des sondes de Hall. Nous pouvons également lister les avantages mis en exergue au regard des performances des chaînes de détection :

- Fort potentiel de détection et caractérisation de défauts sous jacents (taille, profondeur, etc...) [32, 33]
- Caractérisation des propriétés physiques des matériaux [37]

Les travaux de l'équipe électronique du GREYC

Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la technologie GMR et/ou GMI qui, parmi les capteurs décrits ci-dessus, présente de nombreux avantages liés notamment à leur facilité de mise en œuvre et à leur faible coût de fabrication et d'implémentation. Le niveau de bruit de ces dispositifs est tout à fait compatible avec les niveaux de sensibilité estimés et nécessaires pour les applications de contrôle non destructif (variations du champ locales estimées comprises entre qq. 10 pT à 500 μ T par Hz de bande passante de détection suivant les anomalies recherchées dans une gamme de fréquence d'excitation du continu à quelques dizaines de kHz). Dans ce cadre, nous avons cherché à réaliser un certain nombre de démonstrateurs permettant de quantifier les performances des systèmes mis en œuvre.

Mono-sonde à un capteur, mono-sonde à multiples capteurs et multi-sondes à multiples capteurs permettant la mesure et l'imagerie de l'Induction Locale en Excitation Alternative.

Les sondes, que nous avons développées et utilisées, sont réalisées à l'aide de magnétorésistances ou de magnétoimpédances. Les principales performances de ces dispositifs sont un faible niveau de bruit intrinsèque en zone de bruit blanc, une très grande plage de linéarité et une forte dynamique [12, 34]. Cette dernière atteint plus de 140 dB dans 1 Hz de bande passante de post détection. Ce design de sonde offre des avantages en terme d'intégration et de robustesse. Elles sont également beaucoup plus souples d'emploi (séparation physique entre l'émetteur et le récepteur) et permettent notamment, à basse fréquence d'excitation, de travailler dans de meilleures conditions de rapport signal à bruit qu'avec les systèmes conventionnels. Des photos de dispositifs utilisant ces sondes sont présentées en figure 4.

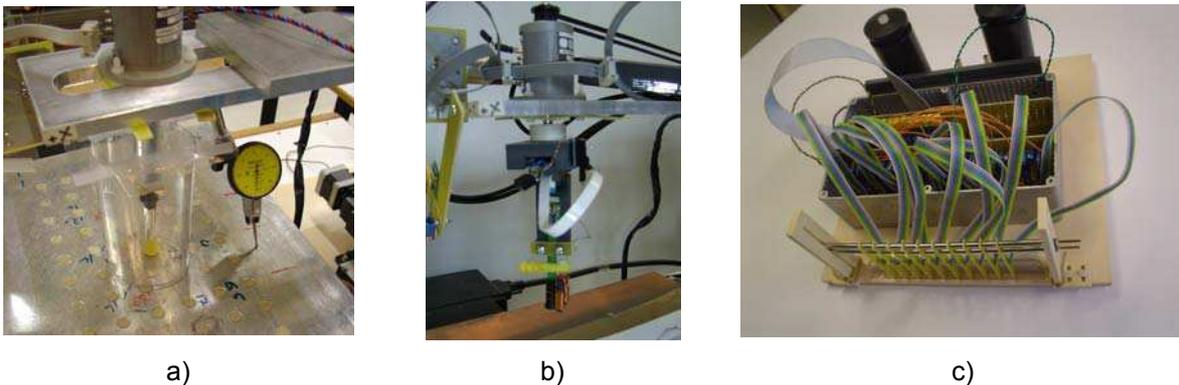
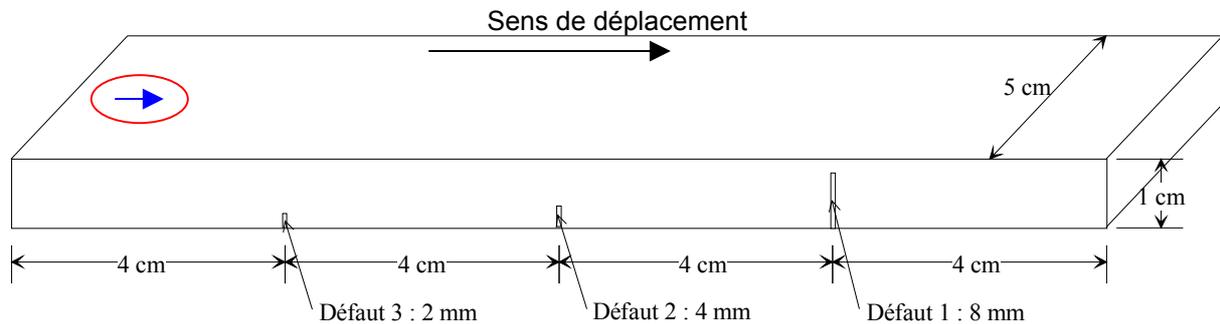


Figure 4 : Présentation d'une mono-sonde sur son support de déplacement 3 axes a), d'une mono-sonde rotative b) et d'une sonde à multiples capteurs c)

Nous récapitulons ci-dessous quelques exemples de caractérisations obtenues dans des conditions expérimentales de laboratoires pour la mesure de l'IL/EA. La représentation des résultats utilise le mode classique d'observation donnée par la figure de Lissajous représentative de la variation de l'amplitude et de la phase du signal observé au regard du signal de référence, le courant d'excitation. Les caractérisations présentées en figure 5 ont été réalisées sur une cale en aluminium de 1 cm d'épaisseur, à une fréquence d'excitation de 108 Hz et pour une mesure de la composante tangentielle de l'IL/EA présente sur la face opposée aux défauts. L'inducteur utilisé est une bobine d'environ 1 cm de diamètre comportant en son centre le magnétomètre. Le balayage est effectué au centre de la plaque dans le sens de sa plus grande longueur. Lorsque le balayage démarre (et se termine), la sonde est située à quelques dizaine de centimètres des extrémités latérales et est donc hors de la plaque. Nous pouvons observer distinctement sur ces courbes, dans un premier temps, les effets de variation liées aux passages des bords de plaque, et dans un second temps, la présence des défauts avec un rapport signal à bruit pour, respectivement, chacun des défauts de 75 dB, 62 dB et 45 dB, et ce, dans 0,5 Hz de bande passante de post détection. Il

est à noter qu'il n'a pas été nécessaire de centrer la courbe d'observation. Un simple zoom sur la zone utile suffit à détailler le changement de réponse liée à la présence d'un défaut, et ce, grâce à la très grande dynamique du système.



Géométrie de la cale de référence utilisée (position et composante de l'induction mesurée par le magnétomètre - flèche bleue, inducteur utilisée - ligne rouge)

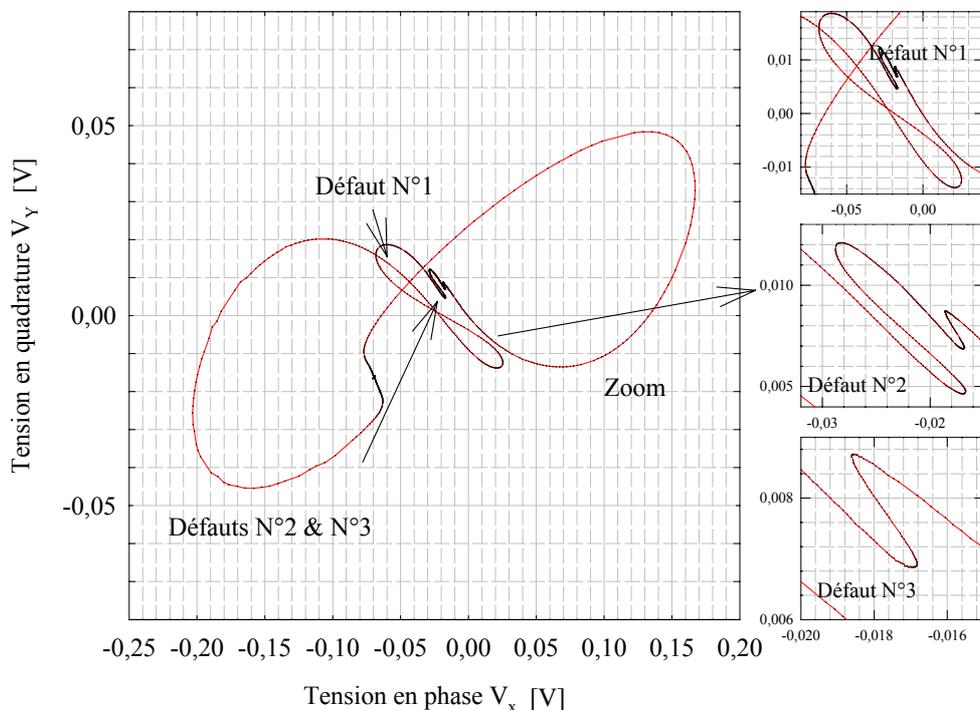


Figure 5 : Exemple de détection de fissures (cale aluminium) pour une fréquence d'excitation de 108 Hz et une sensibilité du magnétomètre de 1000 V/T [12]

Les résultats de mesure présentés ci-dessous utilisent le capteur décrit précédemment et un inducteur dédié et optimisé [35]. Le principe de cette mesure utilise la rotation d'une sonde centrée sur des rivets à analyser afin d'observer l'apparition d'une signature caractéristique d'un défaut, tels que ceux qui ont été réalisés sur la plaque de test. Ainsi, les résultats que nous présentons ici ont été obtenus sur une plaque de référence en Al/2024T3 (type aéronautique). Les rivets sont en titane, simplement posés et non sertis. Nous présentons l'observation de la signature dans un premier temps à l'aplomb de 5 rivets dont deux présentant des fissures latérales. Ces fissures sont expérimentalement placées, dans l'exemple donné, en couche 3 de l'assemblage, soit à une profondeur de 6 mm de la surface. Les fissures, de 12 et 7 mm de longueur, ont été réalisées par électroérosion. La figure 6 présente une vue en coupe de la cale d'essai et les résultats obtenus.

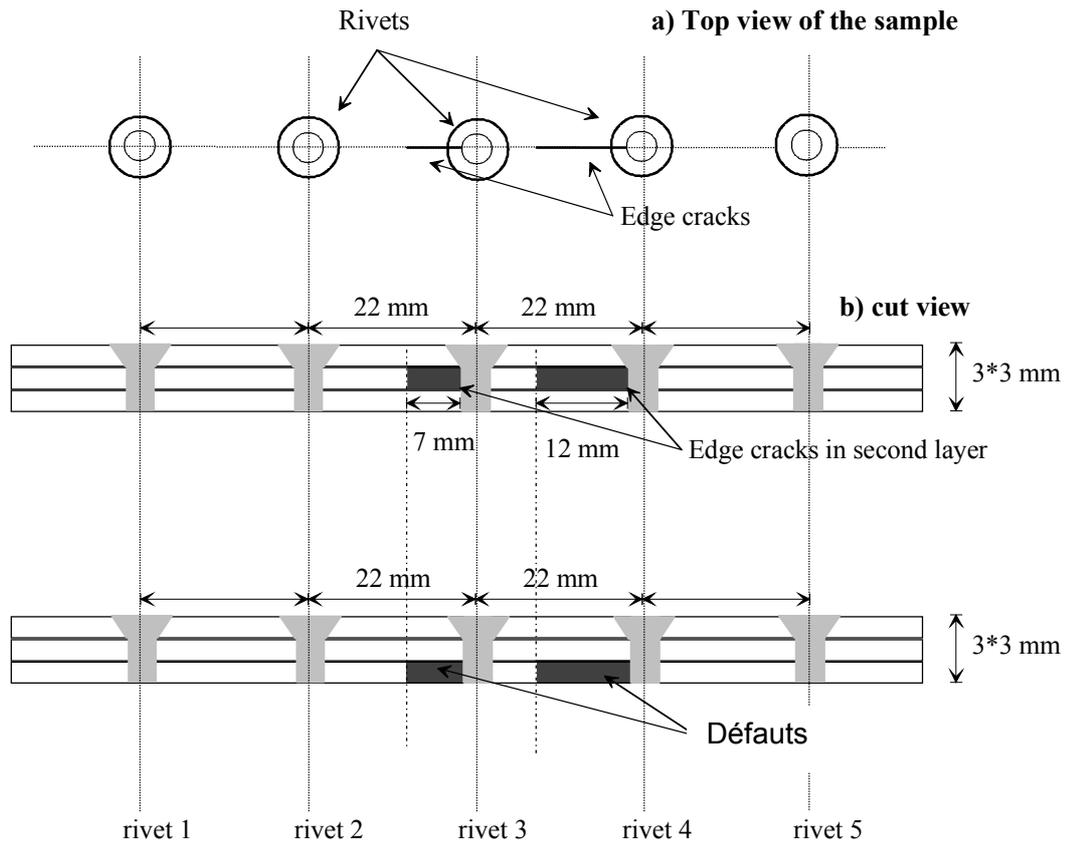


Figure 6-a : Vue en coupe de la cale d'essai utilisée

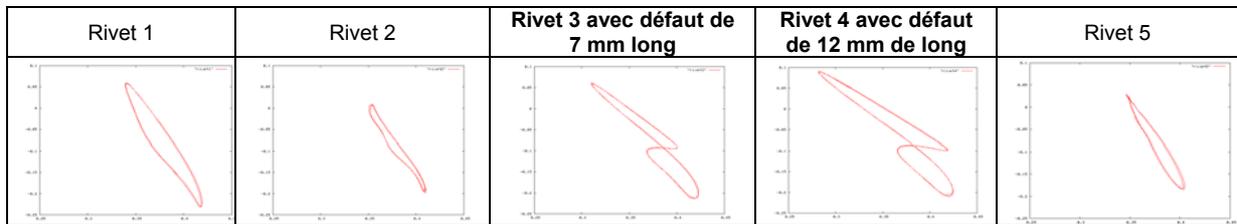
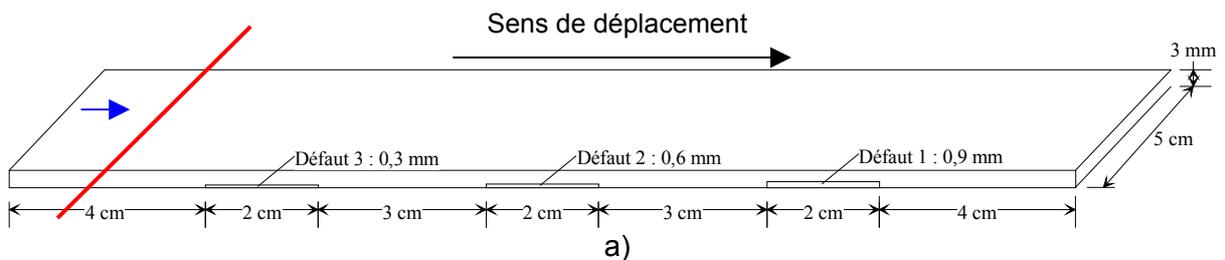
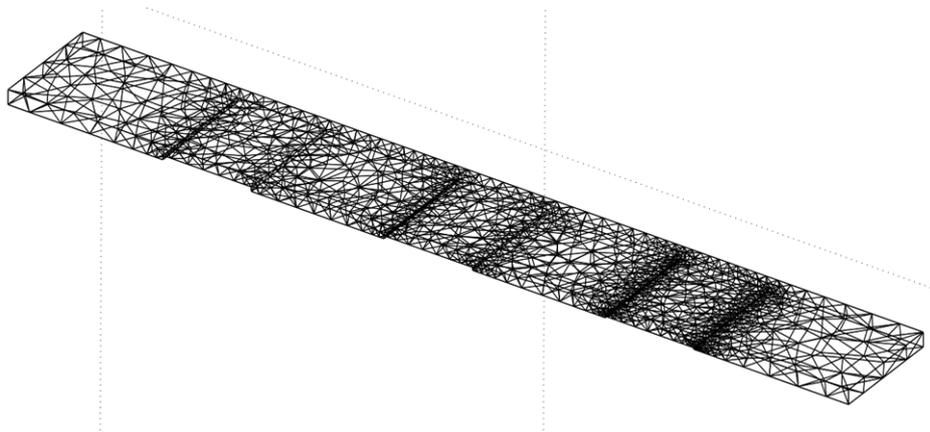


Figure 6-b : Exemple de signatures obtenues pour la détection de fissure de bord de rivet [35]

Comparaison aux attentes théoriques - Un cas concret.

Nous avons également cherché à comparer nos résultats expérimentaux aux attentes théoriques. Pour cela, nous avons simulé à l'aide d'un logiciel à élément fini COMSOL® le cas d'une excitation filaire et d'une détection des composantes en phase et en quadrature du champ magnétique normale au plan de la cale (cf. figure 7).

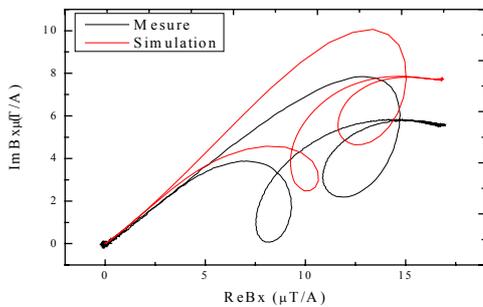




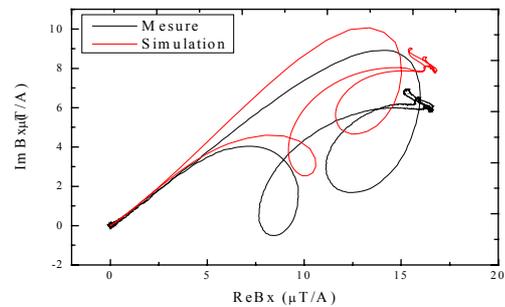
b)

Figure 7 : Présentation de la cale et des défauts associés (position et composante de l'induction mesurée par le magnétomètre - flèche bleue, inducteur filaire utilisé - ligne rouge) a), vue du maillage de la structure utilisée en simulation

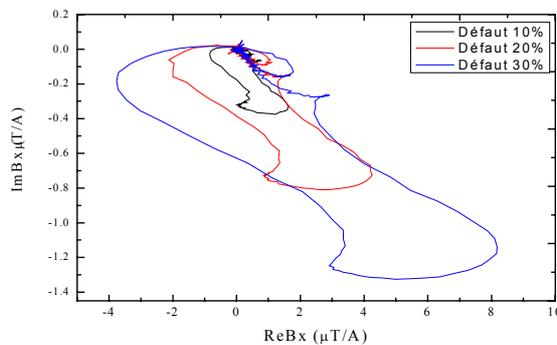
Le magnétomètre est positionné au centre de la plaque et se déplace conjointement avec l'inducteur dans le sens de sa plus grande longueur. Lorsque le balayage démarre (et se termine), la sonde est située à quelques centimètres des extrémités latérales et est donc hors de la plaque. Comme dans le cas précédent, nous pouvons observer distinctement sur ces courbes, dans un premier temps, les effets de variations liées aux passages des bords de plaque, et dans un second temps, la présence des défauts. Le rapport signal à bruit expérimental mesuré est respectivement de 40 dB, 52 dB, 66 dB pour les 3 défauts (ordre croissants) [36]. Les résultats présentés en figure 8 montrent la très bonne adéquation entre les mesures et la simulation (amplitude de l'induction et phase) et la signature explicite de chacun des trois défauts. La figure 9 montre des images observables par l'utilisation d'un système à multiples capteurs utilisant cet inducteur et donnant explicitement des informations sur les défauts.



a)



b)



c)

Figure 8 : Exemple des signatures globales obtenues lors d'un balayage d'une cale avec et sans défauts a) et extraction de la signature des défauts par simple soustraction des courbes avec et sans défauts (faites à partir des données simulées) c).

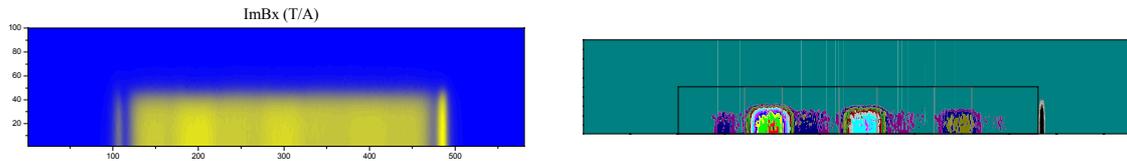


Figure 9 : Exemple d'images magnétiques observables, lors d'un balayage d'une cale présentant des défauts, à l'aide d'un système à multiples capteurs a), après un traitement numérique de l'image précédente par un simple seuillage b). Ici, seule la moitié droite de la cale est représentée.

Mesure d'induction locale en Excitation Pulsée

Nous avons utilisées pour réaliser la mesure de l'IL/EP les même sondes que celles présentées précédemment. Le principe de la mesure est rappelé en figure 9.

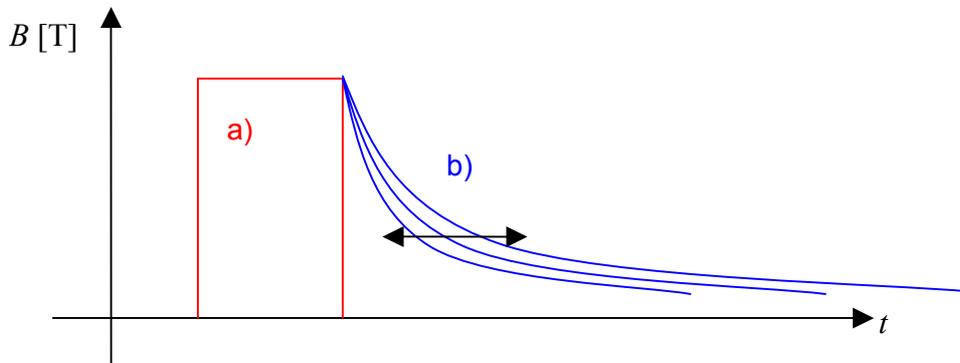
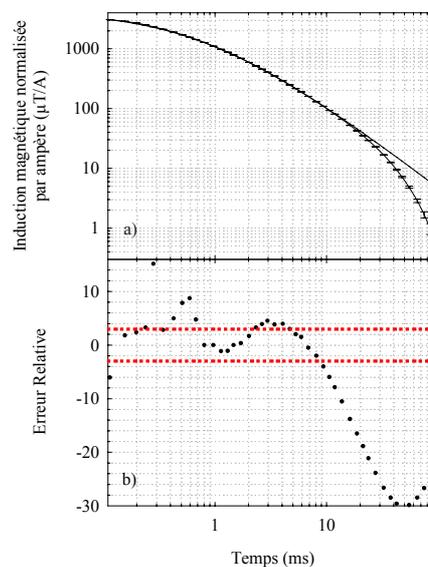


Figure 9 : Principe de la mesure de l'Induction locale en excitation pulsée, pulse en champ a), variation de la réponse, après le pulse, au regard des propriétés du matériaux b).

Nous avons montré qu'il était possible de caractériser avec une très bonne précision les principales propriétés d'un matériau conducteur, telles que sa résistivité, son épaisseur et sa perméabilité [37].



a)

b)

Figure 10 : Exemple d'un banc de caractérisation pour la mesure d'induction locale en excitation Pulsée a) et d'une réponse typique observé après un pulse de champ, courbes expérimentale et théorique (l'erreur relative de la mesure est donnée en figure jointe) b)

Pour ces mesures, nous avons utilisé le système d'acquisition et de traitement développé par la société RTD-INCOTEST[®]. Les résultats, tels que ceux présentés en figure 10, ont montré la très bonne adéquation des mesures aux attentes théoriques. Les principaux avantages de la méthode sont la possible réduction de la résolution spatiale des sondes au regard des systèmes conventionnels, la réalisation de systèmes à multiple tête et la notable réduction de la consommation électrique du système par la réduction des amplitudes des pulses de champ générés. A titre d'exemple, la précision de la mesure de l'épaisseur de différentes cales a été évaluée à mieux que 0,01% [38].

Conclusion

Nous avons présenté une revue de l'état de l'art des développements en CND par la mesure de l'induction locale et mettant en œuvre des magnétomètres à hautes et très hautes sensibilités. L'ensemble de ces résultats montre l'apport de ces technologies innovantes en contrôle non destructif. Néanmoins, nous pouvons regretter que les nombreux travaux présentés souffrent d'une réelle comparaison des performances des résultats au regard des attentes théoriques, des systèmes conventionnels et de la problématique de la mesure. De nombreux résultats restent qualitatifs. Ils montrent, cependant, la possibilité de détection de défauts dans des pièces conductrices, par mesure de la composante tangentielle ou normale de l'induction locale dans l'air, la pièce étant excitée ou non par un champ magnétique continu ou alternatif. En conséquence, le fort potentiel de ces dispositifs n'est plus à prouver. Ils devraient ouvrir la voie à de nouveaux systèmes de mesure à mono et/ou multiples éléments, permettant l'observation de surface complexe et/ou importante, et permettre le développement de système d'imagerie de l'induction locale simple et robuste.

Références bibliographiques

-
- [1] International Scientific Autumn School, High Sensitivity Magnetometers, "Sensors & Applications", 3th Edition, 24 – 28 Septembre 2007, Blainville sur Mer (50), Normandie, France, <http://users.info.unicaen.fr/~ssaiez/>
- [2] G.Waché, L.Perez, C.Dolabdjian, B.Guillo, Récentes évolutions technologiques des méthodes électromagnétiques de détection de défauts dans des pièces conductrices, Cofrend - Les journées de Beaume mai 2005
- [3] The SQUID Handbook: Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems, Volume I, John Clarke, Alex I. Braginski, Wiley-VCH Verlag GmbH&Co, KGaA, Weinheim, 2004 et 2006
- [4] H. Weinstock, SQUID Sensors : fundamentals, fabrications and applications, NATO ASI series E: Applied Science, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [5] P.Ripka, Advances in fluxgate sensors ,Sensors and Actuators A: Physical, Volume 106, Issues 1-3, 15 September 2003, Pages 8-14
- [6] <http://www.bartington.com/>
- [7] Hall Effect devices, R.Popovic, IOP Publishing, Series in sensors, Bristol and Philadelphia.
- [8] Thin films magnetoresistive sensors, S.Tumanski, IOP Publishing, Series in sensors, Bristol and Philadelphia.
- [9] C.Fermon, M.Pannetier-Lecoœur, N.Biziere, B.Cousin, "Optimised GMR sensors for low and high frequencies applications", Sensors and Actuators A: Physical, Volume 129, Issues 1-2, 24 May 2006, Pages 203-206.

-
- [10] A. Boukhenoufa, C. Dolabdjian, D. Robbes, High sensitivity Giant Magneto-Inductive magnetometer characterization implemented with a low frequency magnetic noise reduction technique, *IEEE Sensors Journal*, 5(5), 916-923(2005)
- [11] Junyi Zhai, Zengping Xing, Shuxiang Dong, Jiefang Li, D. Viehland, Detection of pico-Tesla magnetic fields using magneto-electric sensors at room temperature, *Appl. Phys. Lett.* 88, 062510 (2006); DOI:10.1063/1.2172706
- [12] L. Perez, C. Dolabdjian, G. Waché, L. Butin, Advance in magnetoresistance magnetometer performances applied in eddy current sensor arrays, 16th WCNDT'04 Conference, 28 Aout - 03 Septembre, Montréal (2004)
- [13] C. Dolabdjian, A. Qasimi, D. Bloyet, V. Mosser, Spatial resolution of SQUID magnetometers and comparison with that of low noise room temperature sensors, *Physica C*, 386(1-4), 80-84(2002)
- [14] D. Robbes, Highly sensitive Magnetometers, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 129, Issues 1-2, 24 May 2006, Pages 86-93
- [15] S. Singh, B P C Rao, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar, and B. Raj, Detection of leakage magnetic flux from near-side and far-side defects in carbon steel plates using a giant magneto resistive sensor, *Meas. Sci. Technol.* 19, 2008, 015702 (8pp).
- [16] W. Sharatchandra, B. Rao, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar, B. Raj, Detection of leakage magnetic flux from near-side and far-side defects in carbon steel plates using a giant magneto-resistive sensor, *Meas. Sci. Technol.* 19(2008) 015702 (8pp)
- [17] H. Krause, W. Wolf, W. Glaas, E. Zimmermann, M. Faley, G. Sawade, R. Mattheus, G. Neudert, U. Gampe, J. Krieger, SQUID array for magnetic inspection of prestressed concrete bridges, *Physica C* 368(2002) 91-95
- [18] H.H. Qi, P.L. Lang, M.J. Zhang, T.S. Wang, D.N. Zheng, and Y.J. Tian, High-Tc dc-SQUID magnetometer and its application in eddy current non-destructive evaluation, *Cryogenics*, Vol. 44, 2004, pp. 695–699.
- [19] S. Keenan, E.J. Romans, and G.B. Donaldson, HTS SQUID NDE of Curved Surfaces Using Background Field Cancellation Techniques, *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 17, No. 2, June 2007, pp.784–787.
- [20] K. Okita, M. Tsuduki, K. Sakuta, and H. Itozaki, Remote NDE using high-Tc SQUID, *Physica C* 463–465, 2007, pp. 1052–1055.
- [21] M. Pattabiraman, R. Nagendran, and M.P. Janawadkar, Rapid flaw depth estimation from SQUID-based eddy current nondestructive evaluation, *NDT&E International*, Vol.40, 2007, pp. 289–293.
- [22] C. Bonavolonta, M. Valentino, G. Pelouso, and A. Barone, Non Destructive Evaluation of Advanced Composite Materials for Aerospace Application Using HTS SQUIDs, *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol.17, June 2007, pp. 772–775.
- [23] Y. Hatsukade, S. Okumo, K. Mori, and S. Tanaka, Eddy-Current-Based SQUID-NDE for Detection of Surface Flaws on Copper Tubes, *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, Vol. 17, No. 2, June 2007, pp.780–783.
- [24] K. Chomsuwan, S. Yamada, M. Iwahara, H. Wakiwaka, and S. Shoji, Application of Eddy-Current Testing Technique for High-Density Double-Layer Printed Circuit Board Inspection, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 41, NO. 10, OCTOBER 2005, pp. 3619-3621.
- [25] L. Butin, G. Waché, L. Perez, and C. Dolabdjian, New NDE perspectives with magnetoresistance array technologies – from research to industrial applications, *MAGNETIC SENSORS*, Insight, Vol 47, No 5, May 2005, pp. 280–284.
- [26] K. Allweins, M. Von Kreutzbruck, G. Gierelt, Defect detection in aluminum laser welds using an anisotropic magnetoresistive sensor array, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, Vol. 97, 2005, 10Q102.
- [27] A. Yashan, W. Bisle, Inspection of Hidden Defects in Metal-Metal Joints of Aircraft Structures Using Eddy Current Technique with GMR Sensor Array, *ECNDT'06*

-
- [28] J. T. Jeng, G. S. Lee, W. C. Liao, and C. L. Shu, Depth-resolved eddy-current detection with GMR magnetometer, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 304, 2007, pp. e470–e473.
- [29] C. H. Smith, R. W. Schneider, T. Dogaru, and S. T. Smith, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 2323, ed. by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, (American Institute of Physics, Melville, NY, 2003) pp 406-413
- [30] T. Somsak, K. Chomsuwan, S. Yamada, and M. Iwahara, Conductive Microbead Array Detection Based on Eddy-Current Testing Using SV-GMR Sensor and Helmholtz Coil Exciter, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 42, NO. 10, October 2006, pp. 275–283.
- [31] Brevet US2005171703, JENTEK SENSORS INC (US)
- [32] John W. Wilson, Gui Yun Tian, Pulsed electromagnetic methods for defect detection and characterization, *NDT&E International*, Vol.40, 2007, pp. 275–283.
- [33] G.Y. Tian, A. Sophian, D. Taylor, and J. Rudlin, Multiple Sensors on Pulsed Eddy-Current Detection for 3-D Subsurface Crack Assessment, *IEEE SENSORS JOURNAL*, Vol. 5, NO. 1, February 2005, pp. 90-96.
- [34] L.Perez, C.Dolabdjian, L.Butin, Investigation in detection of fatigue cracks under rivet head airframe using improved GMR magnetometer in an Eddy Current System, *Jour. of Elec. Eng.*, 55(10/S), 73-76(2004)
- [35] C.Dolabdjian, G.Waché, L.Perez, Improvement in subsurface fatigue cracks under airframes fasteners detection using improved rotary Giant MagnetoResistance Magnetometer head, *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 49(2), 133-136, March 2007 - Issue.
- [36] R.Hamia, C.Cordier, S.Saez, C.Dolabdjian, Capteurs magnétiques à très haute sensibilité pour la détection de défauts dans des matériaux conducteurs, *Journée "CND par courants de Foucault : de la mesure à l'imagerie" du 29 janvier 2008*
- [37] C. Dolabdjian, L. Perez, Victor O. De Haan, and Paul A. De Jong, Performance of Magnetic Pulsed-Eddy-Current System Using High Dynamic and High Linearity Improved Giant MagnetoResistance Magnetometer, *IEEE SENSORS JOURNAL*, Vol. 6, No. 6, Decembre 2006, pp.1511–1517.
- [38] V.O. de Haan, P.A. de Jong, L.Perez, C.Dolabdjian, Towards material characterization and thickness measurements using Pulsed Eddy Currents implemented with an Improved Giant MagnetoResistance Magnetometer, *ECNDT'06 Conference*, 25 - 29 September, Berlin (2006)