

# UNE MÉTHODE DE DIFFÉRENCE POUR LA MODÉLISATION D'UN CAS DE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF PAR COURANTS DE FOUCAULT

## A DIFFERENCE METHOD FOR THE MODELING OF A NON DESTRUCTIVE CONTROL BY EDDY CURRENTS

L. Bettaieb<sup>1</sup>, H. Kokabi<sup>1</sup>, M. Poloujadoff<sup>1</sup>, A. Sentz<sup>1</sup>, C. Coillot<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Instruments et Systèmes d'Ile de France (LISIF),

Université Pierre et Marie Curie, 3, Rue Galilée, 94200 Ivry Sur Seine

<sup>2</sup> Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires, 10-12, Avenue de l'Europe  
78140 Vélizy-Villacoublay

### Résumé

Les auteurs rappellent d'abord par quelle méthode ils ont précédemment étudié la différence de certaines composantes de champ correspondant à une pièce métallique et à une pièce métallique semblable comportant une fente calibrée. Ils décrivent ensuite une étude directe de cette différence.

### Abstract

*In a previous study the authors have studied the field created, under given conditions, by a sane piece of metal, and the by a similar piece with a calibrated crack. In the present study, they directly evaluate that difference.*

## I. INTRODUCTION

Nous étudions la détection des défauts dans des matériaux métalliques amagnétiques. En effet, ce genre de métaux comme l'aluminium, est très utilisé en aéronautique, dans les structures des avions. Des méthodes de contrôle de qualité et de caractérisation de haute performance sont souvent nécessaires compte tenu de ce domaine d'application.

Le CND avec des courants de Foucault consiste à créer des courants induits dans des matériaux conducteurs à l'aide d'un champ magnétique extérieur (généralisé par des bobines, par exemple de Helmholtz). La distribution et la répartition de ces courants induits dépendent de l'amplitude, de la fréquence et de l'orientation du champ magnétique d'excitation, de la géométrie, de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique de la structure examinée, donc d'éventuels défauts (fissures, trous, etc. ...). Ces courants induits créent un champ que l'on étudie avec un capteur magnétique (SQUID ou effet Hall).

## II. CHAÎNE DE MESURE

La chaîne de mesure est principalement composée des éléments suivants (figure 1):

- L'élément de mesure : le capteur magnétique (avec son électronique de commande : intégrant une phase d'amplification et de réduction de bruit) utilisé pour la mesure du champ induit (ici, un capteur à effet Hall).
- Deux bobines de Helmholtz : qui engendrent un champ magnétique alternatif uniforme, qui crée des courants induits dans les matériaux conducteurs à examiner.
- Un support de l'échantillon qui se déplace en X-Y par l'intermédiaire de deux moteurs à courant continu et manuellement suivant Z. La structure est fabriquée en Plexiglas pour minimiser le bruit magnétique.
- Un amplificateur Lock-In (ici, SR530), qui permet d'extraire le signal utile du signal d'excitation. Ce procédé est dit détection synchrone, largement utilisé dans ce type d'application.
- Un ordinateur : qui permet la commande des deux moteurs à courant continu au cours de l'inspection de l'échantillon. Il est aussi équipé d'une carte d'acquisition de données.

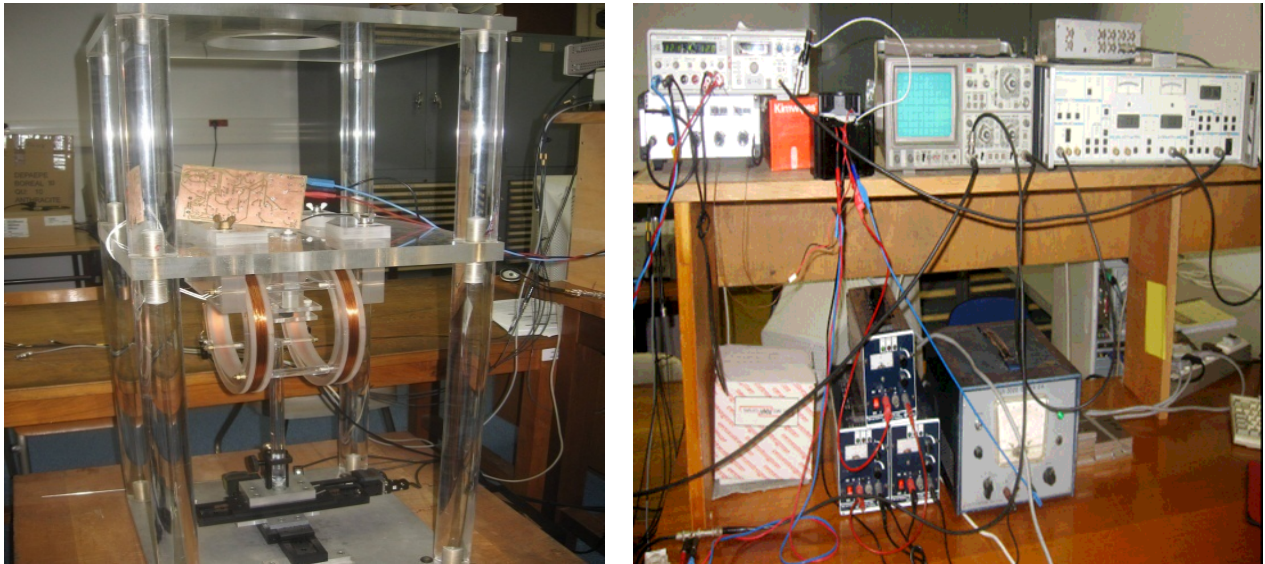


Figure 1 L'instrumentation d'inspection avec différentes éléments de la chaîne de mesure

Dans cette communication nous présentons des mesures effectuées avec un capteur à effet Hall sera placé au moins à 0.5mm de l'échantillon. Le champ d'excitation créé par la bobine de Helmholtz a une fréquence  $f = 180 \text{ Hz}$  ; son amplitude est  $2.45 \text{ e} - 4 \text{ T}$ . Avec ce fort signal d'excitation et à très faible distance d'inspection, notre instrumentation est capable de détecter des défauts de petite taille.

## III. PRINCIPE GENERAL DE MODELISATION

La modélisation consiste à calculer le champ induit par un échantillon soumis à un champ d'excitation extérieur, cette modélisation dite « problème direct » [1], permet de décrire au mieux les valeurs des champs induits d'échantillons de formes diverses, avec ou sans défaut et de différentes dimensions.

Soit une plaque rectangulaire de dimensions 110, 100 et 5 mm dans les directions x, y, z respectivement (figure 2), soumise à un champ magnétique uniforme  $\vec{B}_{exc}$  d'amplitude  $B_m = 2.45e - 4 T$  et de fréquence  $f = 160 Hz$ . Des courants induits vont être créés dans la plaque ; à leur tour ils vont induire un champ magnétique. Le potentiel vecteur d'excitation au point  $p$  située à l'intérieur de la plaque est égal à  $B_{exc} p_z$ , ( $p_z$  est l'ordonnée du point  $p$ , figure 2). La densité du courant induit en ce point vaut  $\frac{1}{\rho} p_z \frac{dB_{exc}}{dt}$ . Pour déterminer le potentiel vecteur  $A$  au point  $P$  engendré par ces courants induits, on divise la section transversale de la plaque en nombreuses petites surfaces. Chacune d'entre elles, de centre  $p(p_y, p_z)$ , a une surface  $\Delta S$ . Ensuite, on additionne ces vecteurs potentiels:

$$A(P) = \sum \frac{1}{\rho} p_z \frac{dB_{exc}}{dt} \frac{\mu_0 \Delta S}{2\pi} \log \left( \frac{OP}{Op} \right)$$

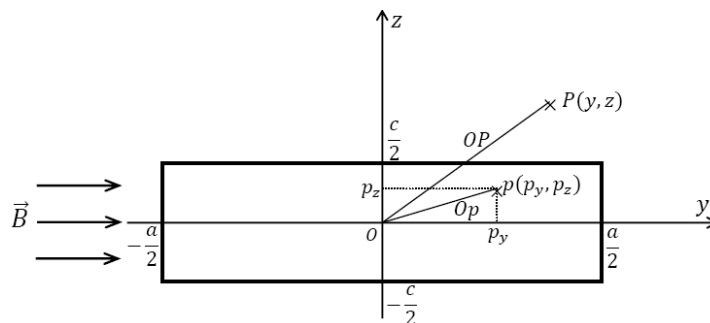


Figure 2 Modélisation du champ émis au point  $P$  créé par les courants de Foucault.

Les composantes  $B_y$  et  $B_z$  du champ induit sont déduits du potentiel vecteur  $A(P)$  par une simple dérivation :

$$B_x = \frac{\partial A(P)}{\partial z} \quad B_y = \frac{\partial A(P)}{\partial y}, \text{ ou par la méthode de Biot et Savart.}$$

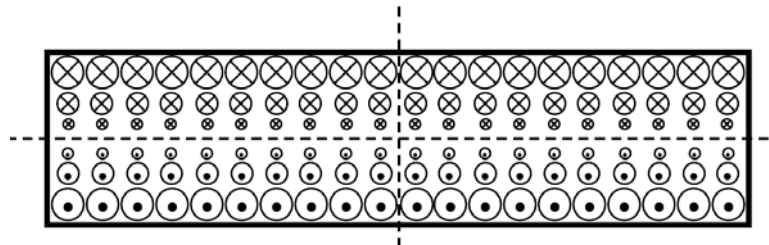


Figure 3 Distribution de la densité de courant dans la plaque saine.

Notons ici, que nous avons négligé les courants créés par les courants induits, cette approximation est amplement justifiée par les ordres de grandeur.

Les valeurs des composantes  $B_y$  et  $B_z$  du champ induit sont tracées sur la figure 4 ; il est clair dans notre cas que l'amplitude du champ induit est très faible par rapport au champ d'excitation.

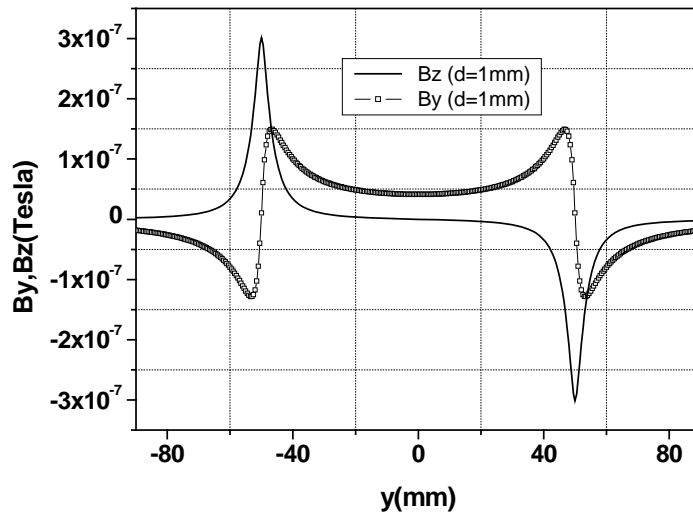


Figure 4 Composantes  $B_y$  et  $B_z$  calculées à une distance  $d = 1 \text{ mm}$  au dessus de la surface d'une plaque sans défaut

Ensuite, nous examinons la même plaque, où un défaut calibré (fente) de largeur  $w$  et de profondeur  $dep$  a été créé au milieu de la face supérieure (figure 5).

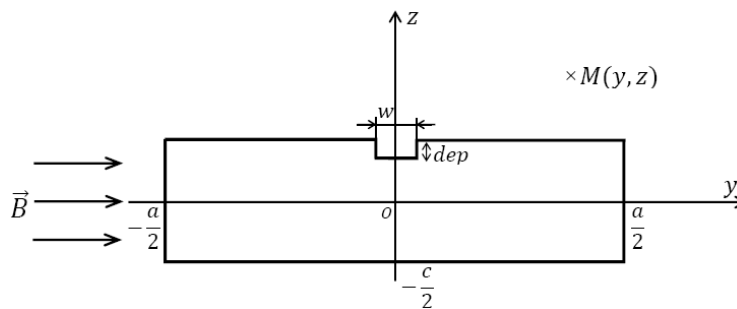


Figure 5 Plaque avec un défaut calibré

Le même principe de modélisation est utilisé. En effet la plaque est équivalente à trois morceaux juxtaposés; chacun d'entre eux possède son propre référentiel  $y_0z$ . Le champ induit total est la superposition de ces trois contributions.

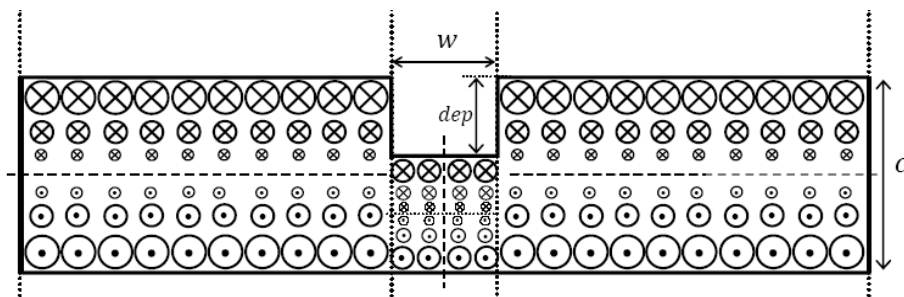


Figure 6 Distribution de la densité de courant dans une plaque avec défaut calibré.

Dans le cas d'une fente de largeur  $w = 2 \text{ mm}$  et de profondeur  $dep = 2 \text{ mm}$  le champ induit est présenté par la courbe suivante (figure 7) :

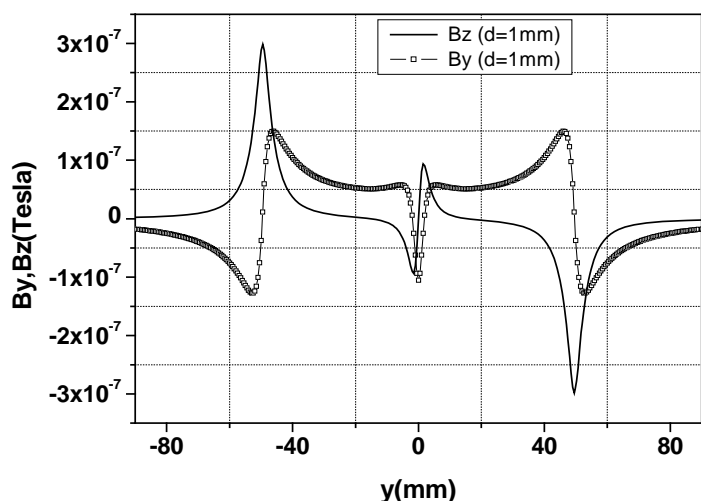


Figure 7 Composantes  $B_y$  et  $B_z$  calculées à une distance  $d = 1 \text{ mm}$  au dessus de la surface d'une plaque avec défaut (fente  $2 \times 2 \text{ mm}$ )

Les courbes de champ induit dans les cas de plaque avec ou sans fente diffèrent notablement. C'est ce genre de différence qui nous permettra d'identifier et de caractériser facilement tous types d'anomalies présentes dans la structure à examiner.

#### IV. MODELISATION PAR DIFFERENCE

Nous allons maintenant présenter la méthode [2] ci dessus d'une façon très différente, qui permettra d'individualiser le défaut au milieu de l'ensemble considéré. A cette fin, nous pourrons considérer la répartition de courant décrite par la figure 6 comme la répartition décrite par la figure 3, de laquelle nous retranchons la répartition définie par la figure 8 (A), puis à laquelle nous ajoutons la répartition de la figure 8 (B). Ainsi, le signal engendré par les courants induits sera identique à celui observé dans le cas d'une plaque saine (figure 2 et 4), auquel s'ajoute le signal engendré par les courants décrits par les figures 8 (C) et 8 (D) (c)

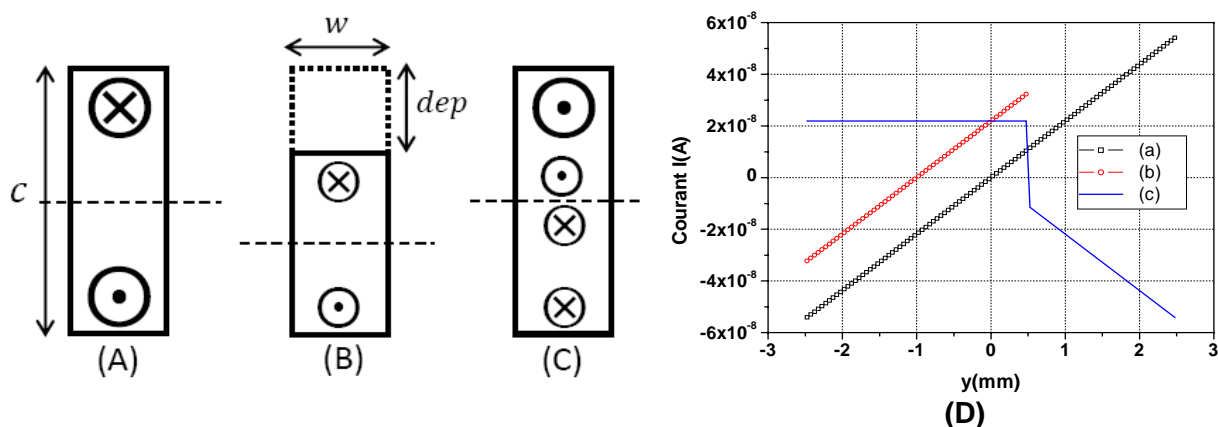


Figure 8 Principe de la modélisation par différence  
 (A) Partie centrale de la plaque avant l'apparition du défaut, (B) Même partie, après apparition du défaut, (C) Différence des courants induits dans la partie considérée, avant et après l'apparition du défaut, (D) Répartition de la densité de courant correspondant au différents cas.

On a donc bien réalisé un modèle du « défaut isolé de son contexte ». Les courbes des composantes en y et z du champ correspondant au défaut ainsi isolé, dans ce cas déjà étudié sur la figure 9, sont montrées sur la figure 9. Sur la figure 10, nous décrivons la composante en  $B_z$  de ce champ en fonction de  $w$  et  $dep$ .

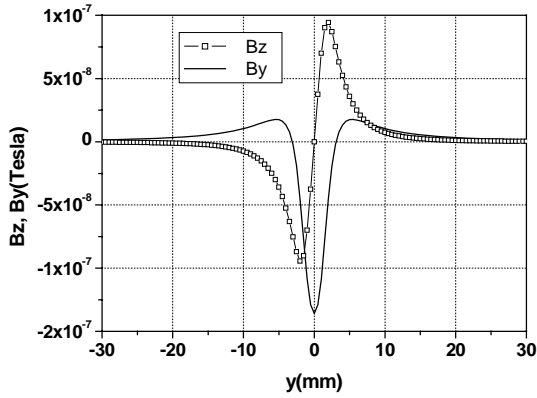


Figure 9 Composantes  $B_z$  et  $B_y$  créées par les seuls courants définis aux figures 8 C et 8 D.

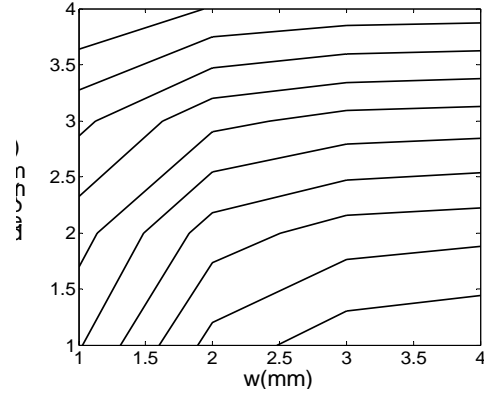


Figure 10 Maximum de la perturbation à  $B_z$  créée par une fente de largeur  $w$  et de profondeur  $dep$ .

## V. MESURES

Des mesures sur des plaques avec fentes de différentes dimensions sont effectuées, les résultats sont présentés sur les figures suivantes (11 & 12). Nous constatons que la composante  $B_z$  mesurée à la même allure que celle de théorie (figures 6 et 13).

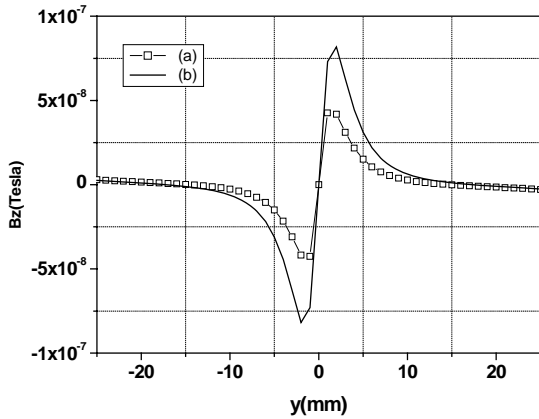


Figure 11 Composante  $B_z$  mesurée à une distance  $d = 1 \text{ mm}$  au dessus de la surface d'une plaque avec défaut (fente de profondeur  $dep = 0.5 \text{ mm}$  et de largeurs (a)  $w = 0.5 \text{ mm}$  ; (b)  $w = 2 \text{ mm}$ )

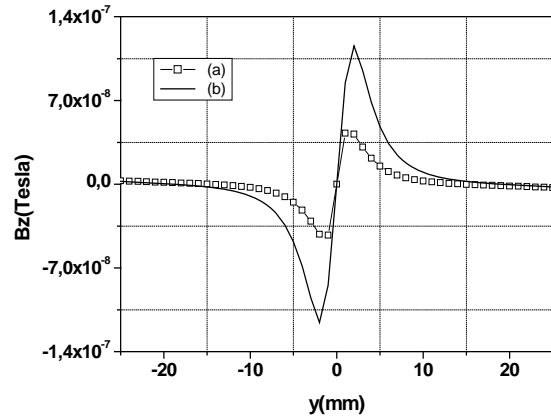


Figure 12 Composante  $B_z$  mesurée à une distance  $d = 0.5 \text{ mm}$  au dessus de la surface d'une plaque avec défaut (fente de largeur  $w = 1 \text{ mm}$  et de profondeurs (a)  $dep = 1 \text{ mm}$  ; (b)  $dep = 2 \text{ mm}$ )

On constate que nos méthode analytiques décrivent parfaitement les variations du champ induit le long de l'axe  $Oy$ , les résultats de mesures concordent bien avec ceux de la modélisation (figure 13).

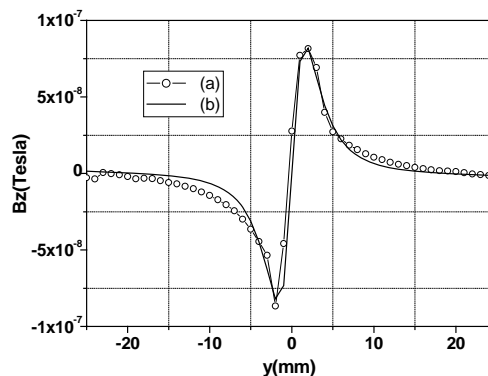


Figure 13 Composantes  $B_z$  mesurée (a) et calculée (b) à une distance  $d = 0.5 \text{ mm}$  au dessus de la surface d'une plaque avec défaut (fente de largeur  $w = 2 \text{ mm}$  et de profondeur  $dep = 1 \text{ mm}$ )

## **VI. CONCLUSION**

Représenter un défaut par une source de courant équivalente est possible. Cette méthode est confirmée par des résultats expérimentaux. Elle permet d'évaluer a priori la possibilité de certaines mesures.

## **REFERENCES**

**[1]** L. Bettaieb, H. Kokabi, M. Poloujadoff, A. Sentz, C. Coillot et A. Tcharkhtchi, « Contrôle non destructif avec des capteurs à Effet Hall : Modélisations et Mesures », Conférence GT3, paris, janvier 2008

**[2]** P. Dular, « Méthode des éléments finis et techniques de perturbation pour la modélisation du contrôle non destructif par courants de Foucault », conférence GT3, paris Janvier 2008.