

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

(11) N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 885 697

(21) N° d'enregistrement national : 05 04822

(51) Int Cl⁸ : G 01 N 27/90 (2006.01)

(12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 13.05.05.

(30) Priorité :

(43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 17.11.06 Bulletin 06/46.

(56) Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : Se reporter à la fin du présent fascicule

(60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

(71) Demandeur(s) : ELECTRICITE DE FRANCE Société anonyme — FR.

(72) Inventeur(s) : DUBOST STEPHANIE, GAUTIER STEPHANE et GOUSSARD YVES.

(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire(s) : REGIMBEAU.

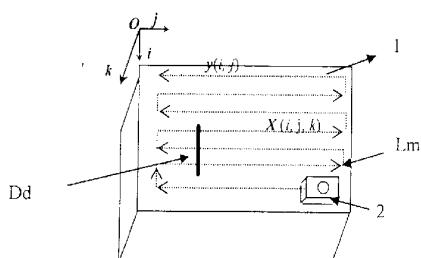
(54) PROCEDE ET SYSTEME DE CARACTERISATION DE DEFAUTS DEBOUCHANT EN SURFACE D'UN COMPOSANT METALLIQUE.

(57) L'invention concerne, selon un premier aspect, un procédé d'inspection d'un composant métallique (1) pour caractérisation des défauts débouchant (Dd) en surface, dans lequel on réalise des mesures à l'aide une sonde (2) de contrôle à courants de Foucault déplacée à la surface du composant métallique (1), caractérisé en ce qu'il comporte les étapes consistant à :

- évaluer les variations de conductivité au sein du composant métallique à partir des mesures des courants de Foucault, et

- déterminer une caractérisation des défauts débouchant à partir de ladite évaluation des variations de conductivité.

L'invention concerne également un système d'inspection comprenant des moyens de traitement adaptés pour la mise en oeuvre du procédé selon le premier aspect.



FR 2 885 697 - A1



Le domaine de l'invention est celui de l'inspection d'un composant métallique pour y déceler des défauts, et notamment des défauts, par exemple de type fissure, débouchant à la surface du composant métallique.

L'invention vise plus précisément à permettre la caractérisation de 5 défauts débouchants dans des composants métalliques.

La détection des défauts débouchants est généralement réalisée à l'aide d'une technique de ressuage. Lorsqu'un défaut est ainsi détecté, sa profondeur peut alors être déterminée à l'aide d'un contrôle supplémentaire réalisé par ultrasons. La caractérisation ainsi obtenue est satisfaisante, 10 hormis dans le cas où la profondeur estimée est inférieure à 5 mm. En effet, les techniques par ultrasons ne permettent généralement pas de distinguer entre des défauts de très faible profondeur (quelques dixièmes de millimètres), et des défauts de profondeur légèrement plus importante (2 à 3 mm) potentiellement évolutifs et qui pourraient devenir préjudiciable à 15 l'intégrité du composant métallique.

Une autre technique proposée dans l'état de l'art consiste à réaliser des contrôles basés sur l'amplitude des courants de Foucault induits en surface d'un composant métallique pour déterminer la profondeur des défauts débouchants. Des opérateurs doivent alors être entraînés à analyser cet effet 20 pour pouvoir réaliser un diagnostic des anomalies. Lorsque certaines caractéristiques (longueur, largeur, forme du défaut) sont connues, il est alors possible d'estimer la profondeur des défauts pour des profondeurs ne dépassant pas 5 mm. Cependant, dans les cas où ces caractéristiques sont inconnues, la profondeur des défauts ne peut être estimée de manière 25 satisfaisante.

L'invention a pour objectif de remédier aux inconvénients de l'état de la technique mentionnés précédemment, et vise à proposer une méthode qui permette de réaliser la caractérisation des défauts débouchants (c'est-à-dire de déterminer notamment leur localisation, longueur, largeur et surtout 30 profondeur), à partir de mesures réalisées à l'aide d'une sonde de contrôle à courants de Foucault déplacée en surface d'un composant métallique.

A cet effet, l'invention propose selon un premier aspect, un procédé d'inspection d'un composant métallique pour caractérisation des défauts débouchants en surface, dans lequel on réalise des mesures à l'aide d'une

sonde de contrôle à courants de Foucault déplacée à la surface du composant métallique, caractérisé en ce qu'il comporte les étapes consistant à :

- évaluer les variations de conductivité au sein du composant métallique
5 à partir des mesures réalisées par la sonde, et
- déterminer une caractérisation des défauts débouchants à partir de ladite évaluation des variations de conductivité.

Certains aspects préférés, mais non limitatifs, de ce procédé sont les suivants :

- 10 - le procédé comporte une étape préliminaire visant à estimer les caractéristiques du composant métallique devant être inspecté, ladite étape préliminaire comprenant l'opération consistant à réaliser des mesures des courant induits par le déplacement de la sonde à la surface d'une maquette en un matériau possédant des caractéristiques proches de celles du composant inspecté, la maquette présentant au moins un défaut étalon de caractérisation connue de sorte que les variations de conductivité au sein 15 de la maquette sont connues ;
- le défaut étalon peut être de type rectangulaire ou semi-circulaire ;
- on considère une relation linéaire entre les mesures des courants de 20 Foucault induits à la surface d'un milieu et la conductivité au sein dudit milieu, un jeu de réponses impulsionales du milieu représentant ainsi l'ensemble des variations des courants de Foucault lorsqu'un défaut ponctuel se trouve successivement en chaque point dudit milieu, et l'étape préliminaire comporte en outre l'opération consistant à estimer le jeu de 25 réponses impulsionales du composant métallique inspecté à partir desdites mesures sur la maquette présentant au moins un défaut étalon ;
- la relation linéaire s'exprime selon $y = Hx + b$, où y désigne les mesures des courants de Foucault, x la conductivité relative au sein du milieu, H la matrice construite à partir des réponses impulsionales h dudit milieu et b le bruit, et l'étape préliminaire consiste à estimer la matrice H à 30 partir des mesures y réalisées sur ladite maquette de conductivité x connue ;

- l'estimation $\hat{\mathbf{h}}$ des réponses impulsionales est obtenue par minimisation du critère des moindres carrés modifié par ajout d'un terme de régularisation $\psi(\mathbf{h})$ représentatif d'informations a priori sur la quantité \mathbf{h} à estimer, l'estimation étant ainsi obtenue selon $\hat{\mathbf{h}} = \text{Arg min}_{\mathbf{h}} \mathbf{J}(\mathbf{h})$,
- 5 où $\mathbf{J}(\mathbf{h}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{h}\|^2 + \psi(\mathbf{h})$, \mathbf{X} étant une matrice construite à partir des valeurs connues de conductivité de la maquette;
- l'évaluation des variations de conductivité au sein du composant métallique inspecté consiste à déterminer la conductivité \mathbf{x} à partir des mesures \mathbf{y} réalisées lors de l'inspection du composant métallique, et de la matrice \mathbf{H} estimée au cours de l'étape préliminaire ;
 - l'estimation de la conductivité relative $\hat{\mathbf{x}}$ permettant l'évaluation des variations de conductivité est obtenue par minimisation du critère des moindres carrés modifié par ajout d'un terme de régularisation $\varphi(\mathbf{x})$ représentatif d'informations a priori sur la quantité \mathbf{x} à estimer, l'évaluation étant ainsi obtenue selon $\hat{\mathbf{x}} = \text{Arg min}_{\mathbf{x}} \mathbf{J}(\mathbf{x})$, où $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 + \varphi(\mathbf{x})$;
 - on peut représenter un défaut sous la forme d'un parallélogramme et la caractérisation d'un défaut débouchant consiste à fournir la localisation, longueur, largeur et profondeur du parallélogramme représentant ledit défaut ;
 - une seule fréquence d'inspection de la sonde est prise en compte ;
 - une pluralité de fréquences d'inspection de la sonde est prise en compte, de sorte que :
 - o lors de l'étape préliminaire, on estime la réponse impulsionale \mathbf{h}_i du composant inspecté à chacune des fréquences d'inspection f_i par minimisation du critère des moindres carrés modifié, en utilisant les mesures \mathbf{y}_i à la fréquence f_i et la conductivité \mathbf{x} connue de la maquette,
 - o et lors de l'étape d'évaluation des variations de conductivité au sein du composant métallique inspectée, on minimise le critère modifié
- 25
$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = w_1 \|\mathbf{y}_1 - \mathbf{H}_1 \mathbf{x}\|^2 + w_2 \|\mathbf{y}_2 - \mathbf{H}_2 \mathbf{x}\|^2 + w_3 \|\mathbf{y}_3 - \mathbf{H}_3 \mathbf{x}\|^2 + \dots \varphi(\mathbf{x}).$$

Selon un autre aspect, l'invention concerne également un système d'inspection d'un composant métallique pour caractérisation des défauts

débouchants en surface, caractérisé en ce qu'il comporte une sonde de contrôle à courants de Foucault apte à être déplacée à la surface du composant métallique pour réaliser des mesures des courants induits, ainsi que des moyens de traitement adaptés pour mettre en œuvre le procédé 5 selon un mode de réalisation possible du premier aspect de l'invention.

D'autres aspects, buts et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée suivante de formes de réalisation préférées de celle-ci, donnée à titre d'exemple non limitatif et faite en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- 10 - la figure 1 représente le principe d'acquisition des mesures des courants de Foucault ;
- la figure 2 représente l'allure des mesures réalisées à différentes fréquences d'inspection sur une maquette présentant différents défauts étalons ;
- 15 - la figure 3 représente des estimations de la réponse impulsionale pour des couches de différentes profondeurs ;
- la figure 4 représente un résultat de reconstruction d'un défaut de type entaille rectangulaire ;
- la figure 5 représente un résultat de reconstruction d'un défaut de type 20 entaille semi-circulaire ;
- la figure 6 représente un exemple de reconstruction d'un défaut de type fissure ;
- la figure 7 représente des estimations de la réponse impulsionale pour 25 des couches de différentes profondeurs, et les figures 8 et 9 représentent des reconstructions de défauts de type entaille rectangulaire ;
- la figure 10 représente des estimations de la réponse impulsionale pour des couches de différentes profondeurs, et la figure 11 représente une reconstruction de défaut.

La présente invention a notamment pour objectif de rendre possible la 30 caractérisation de défauts débouchants de profondeur inférieure à 5 mm dans des composants métalliques, par exemple des composants de type tuyauterie en acier homogène non ferro-magnétique (acier inoxydable austénitique/forgé), et cela en réalisant une inspection non-destructive à

l'aide de mesures réalisées à l'aide d'une sonde de contrôle à courants de Foucault.

A titre d'exemple non limitatif, l'invention se propose d'inspecter les composants métalliques de centrale nucléaire, par exemple certains 5 composants du circuit primaire d'un Réacteur à Eau sous Pression (REP).

L'un des objectifs est plus précisément ici de discriminer les défauts en fonction de leur profondeur, et notamment de distinguer les défauts superficiels des défauts plus profonds afin d'entreprendre une action spécifique sur une zone où la présence d'un défaut est avérée (typiquement 10 maintien en exploitation ou réparation).

Le procédé selon l'invention est basé sur une approche par problèmes inverses mettant en oeuvre une inversion permettant, à partir de mesures par courants de Foucault, de déterminer la conductivité relative du milieu étudié, et ainsi d'en déduire une estimation des longueur, largeur et profondeur de 15 défauts débouchants éventuellement présents.

On mentionne ici qu'on peut représenter un défaut sous la forme d'un parallélogramme, la caractérisation du défaut consistant à fournir les localisation, longueur, largeur et profondeur du parallélogramme représentant le défaut.

20 L'élaboration de la méthode d'inversion et l'analyse de la faisabilité de la caractérisation des défauts débouchants ont été faites de manière progressive.

Dans un premier temps, le problème a été traité en 2 dimensions 25 (« 2D »), une seule ligne de mesure étant considérée pour chaque défaut, et le milieu sondé étant considéré comme plan.

Dans un deuxième temps, le problème a entièrement été modélisé en 3 dimensions (« 3D »), les lignes de mesures étant alors considérées dans leur ensemble, et le milieu sondé étant considéré comme étant 3D.

Les deux étapes 2D et 3D sont présentées ci-après successivement, 30 ainsi que les résultats de reconstruction obtenus. Bien entendu, à chacune de ces étapes 2D et 3D correspond un mode de réalisation possible de l'invention.

Comme cela sera démontré par la suite, le procédé selon l'invention permet notamment de réaliser une caractérisation de la profondeur de

défauts, rendant en particulier possible la différenciation des défauts de profondeur inférieure à 1 mm de ceux de profondeur supérieure à 3 mm.

1. Introduction

On rappelle brièvement ci-après le principe du contrôle non destructif par courants de Foucault. D'une manière schématique, une sonde de contrôle à courants de Foucault est déplacée à la surface du composant métallique inspecté (typiquement une tuyauterie), émet un rayonnement et mesure le courant électrique induit résultant de l'interaction de ce rayonnement avec le matériau du composant métallique inspecté.

En l'absence de défaut, le champ électrique est constant dans les deux milieux. Un défaut, défini par une variation spatiale de la conductivité électrique σ par rapport à la valeur nominale du métal sain σ_0 , entraîne une modification du champ électrique dans le matériau et dans son voisinage. La sonde permet alors de mesurer les variations du champ externe, et le cas échéant la présence d'un défaut est révélée.

Dans le cadre de la présente invention, une approche dite par problèmes inverses a été retenue. A partir des mesures effectuées, on cherche alors à reconstruire le milieu sondé en termes de variation de conductivité. Lorsqu'une variation de conductivité est avérée, la présence d'un défaut est probable.

L'approche proposée ci-après permet ainsi de « retrouver » la forme (typiquement longueur, largeur et profondeur) du défaut à partir des mesures par courants de Foucault.

2. Approche par problèmes inverses

2.1. Principe

L'objectif est d'obtenir une représentation du milieu inspecté à l'aide d'une sonde à courants de Foucault, cela afin de pouvoir conclure quant à la présence ou l'absence de défauts, ainsi que sur leur profondeur éventuelle lorsque celle-ci ne dépasse pas 5mm.

On dispose à cet effet de mesures réalisées sur un milieu donné, à l'aide d'une sonde donnée, un pas d'acquisition des mesures connu, selon un certain nombre de lignes de mesures, et pour différentes fréquences d'inspection.

La figure 1 représente le principe d'acquisition des mesures. Une sonde de contrôle à courants de Foucault 2 est déplacée à la surface du milieu 1 à caractériser (composant métallique inspecté, maquette étalcn) selon des lignes de mesure Lm parallèles les unes des autres. Comme cela est 5 représenté, le milieu à caractériser est susceptible de présenter des défauts débouchants Dd, par exemple des défauts s'étendant (longueur) selon l'axe i, s'ouvrant (largeur) selon l'axe j et s'enfonçant (profondeur) dans le composant selon l'axe k.

La représentation du milieu sondé à partir des mesures par courants de 10 Foucault consiste en la construction d'une cartographie de la conductivité relative ($[\sigma_0 - \sigma]/\sigma_0$), où σ_0 désigne la conductivité du métal constituant la pièce).

En l'absence de défaut, la conductivité relative est donc censée être 15 nulle (on a alors $\sigma = \sigma_0$), alors qu'en présence de défaut la conductivité relative est égale à 1 (on a alors $\sigma = 0$).

Le milieu sondé est donc discréteisé en éléments de type pixels en 2D, ou voxels en 3D, et l'objectif est, pour chaque élément du milieu sondé, d'obtenir une estimation de la conductivité relative correspondante. Cette estimation permet de conclure respectivement quant à l'absence ou à la 20 présence d'un défaut.

L'invention concerne bien entendu selon un second aspect un système d'inspection d'un composant métallique pour caractérisation des défauts débouchants en surface, caractérisé en ce qu'il comporte une sonde de contrôle apte à être déplacée, comme cela est illustré sur la figure 1, en 25 surface du composant métallique pour réaliser des mesures de courants induits, ainsi que des moyens de traitement adaptés pour mettre en œuvre l'un au moins des modes de réalisation du procédé de reconstruction du milieu inspecté dont il est fait état dans la présente description.

2.2. Notations

Tout au long de la description, les notations suivantes sont utilisées.

- y est utilisé pour désigner les mesures des courants de Foucault induits réalisés à l'aide de la sonde 2,

- \mathbf{x} est utilisé pour désigner la conductivité relative au sein d'un milieu inspecté. \mathbf{x} est un vecteur représentant la conductivité relative en chaque point (i, j, k) de l'espace. Dans certains cas, on lui préférera une notation matricielle selon laquelle la matrice \mathbf{X} est construite à partir des éléments de \mathbf{x} .

Par convention, on a défini la direction horizontale i comme celle selon laquelle le défaut s'étend (longueur du défaut selon cette direction).

L'objectif de la méthode de reconstruction est d'obtenir, à partir des mesures \mathbf{y} , une estimée $\hat{\mathbf{x}}$ constituée des valeurs estimées de la conductivité en chaque point du volume discrétisé.

2.3. Méthode de résolution

L'obtention de $\hat{\mathbf{x}}$ est faite en résolvant successivement deux problèmes d'estimation (appelés également « problème direct » et « problème inverse ») définis ci-après.

15 □ « Problème direct », « problème inverse »

Afin d'estimer la conductivité \mathbf{x} à partir des mesures \mathbf{y} , il est nécessaire d'exploiter une relation physique entre les deux quantités. Ce lien est contenu dans le modèle direct (ou modèle d'observation) explicitant la relation existant entre la conductivité et les mesures.

20 Un modèle direct linéaire est ici retenu. Ce modèle correspond plus précisément à l'approximation de Born selon laquelle le champ électrique à l'intérieur de la pièce est supposé être le même en l'absence et en présence d'un défaut.

Le modèle direct peut alors s'écrire sous la forme linéaire suivante :

$$25 \quad \mathbf{y} = \mathbf{Hx} + \mathbf{b} \quad (1)$$

où \mathbf{H} est une matrice et \mathbf{b} représente le bruit de mesure et les erreurs de modélisation.

L'objectif est alors d'obtenir une estimation de la conductivité relative \mathbf{x} à partir des mesures \mathbf{y} fournies.

30 Pour cela, la connaissance de \mathbf{H} est nécessaire, et la reconstruction de la conductivité \mathbf{x} est donc faite en deux temps :

- Première étape : Estimation des paramètres du modèle direct

Il s'agit ici d'une étape préliminaire visant à estimer les caractéristiques du composant métallique devant être inspecté. Dans un premier temps, on s'attache donc à caractériser le milieu étudié en estimant les éléments de la matrice H .

5 Cette matrice peut être vue comme l'ensemble des réponses impulsionales du milieu, dans le sens où elle contient l'ensemble de toutes les réponses (mesures) obtenues lorsque le défaut est situé successivement en chaque point du milieu discréte.

Dans ce qui suit, on désignera les réponses impulsionales par la
10 notation RI .

Pour cela, les mesures y provenant de défauts connus (et donc de conductivités relatives x connues) sont utilisées : on cherche donc, pour le modèle direct (1), à estimer les éléments de la matrice H connaissant x et y .

Plus précisément, on réalise des mesures des courants induits lors du
15 déplacement de la sonde à la surface d'une maquette en un matériau possédant des caractéristiques proches de celles du composant inspecté, la maquette présentant au moins un défaut étalon de caractérisation connue de sorte que les variations de conductivité au sein de la maquette sont connues.

Cette étape préliminaire est aussi appelée résolution du problème
20 direct.

On signale que pour cette étape, le problème peut être reformulé de la façon suivante : $y = Xh + b$ (2), où la matrice X est construite à partir des éléments du vecteur x , et où le vecteur b contient les éléments qui permettent de construire la matrice H . Cette formulation strictement
25 équivalente à celle de (1) permet de se ramener à l'écriture classique d'un problème linéaire, dans laquelle les paramètres connus sont contenus dans la matrice X , et les paramètres inconnus sont contenus dans le vecteur b .

✓ Deuxième étape : Résolution du problème inverse

Dans un deuxième temps, on cherche à résoudre le problème posé, à
30 savoir la reconstruction de x (correspondant à un défaut inconnu) à l'aide des mesures y .

Cette deuxième étape est appelée résolution du problème inverse, et consiste donc à estimer les conductivités relatives \mathbf{x} répondant au modèle (1), connaissant \mathbf{y} et \mathbf{H} .

Il s'agit donc ici d'évaluer les variations de conductivité au sein du composant métallique inspecté à partir des mesures des courants induits en surface de ce composant lors du déplacement de la sonde. Bien entendu, on utilise ici les résultats de l'étape préliminaire concernant l'estimation de la réponse impulsionale du composant inspecté.

Techniques de régularisation

Les problèmes direct et inverse définis ci-dessus possèdent une caractéristique commune : l'information contenue dans les données ne permet pas à elle seule d'estimer correctement les paramètres inconnus.

Afin de remédier à ce problème, et selon un mode de réalisation particulièrement avantageux, la présente invention prévoit d'utiliser des techniques dites de régularisation permettant de faire intervenir des informations a priori connues sur les solutions recherchées.

Dans le cadre de la présente invention, et pour les deux problèmes (direct et inverse) considérés, ces informations a priori sont des informations de douceur (c'est-à-dire de variation lente) dans l'espace des solutions recherchées, avec dans certains cas la présence de discontinuités marquées.

Pour les deux problèmes, l'emploi des techniques de régularisation se traduit par l'ajout d'un terme (dit de régularisation) dans le critère des moindres carrés classiquement utilisé pour résoudre un problème linéaire tel que celui présenté en (1).

- Estimation des paramètres du modèle direct (résolution du problème direct)

L'estimée $\hat{\mathbf{h}}$ de la réponse impulsionale \mathbf{h} correspondant au modèle (2) lorsque \mathbf{y} et \mathbf{X} sont connus peut dans certains cas être obtenue par minimisation du critère des moindres carrés $\mathbf{J}(\mathbf{h})$: $\hat{\mathbf{h}} = \text{Arg min}_{\mathbf{h}} \mathbf{J}(\mathbf{h})$, où $\mathbf{J}(\mathbf{h}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{h}\|^2$.

La solution de ce problème est connue analytiquement et nécessite l'inversion de la matrice $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$.

Cependant, comme l'information contenue dans les données ne permet pas à elle seule d'estimer correctement les paramètres inconnus, la matrice $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ est mal conditionnée et son inversion conduit à des estimations $\hat{\mathbf{h}}$ très bruitées.

5 Afin de remédier à ce problème, il est possible d'introduire des informations a priori sur la quantité $\hat{\mathbf{h}}$ à estimer. Le « critère régularisé » utilisé ici permet d'introduire ces informations a priori en ajoutant un « terme de régularisation » qui s'écrit sous la forme d'une somme de termes pénalisant des solutions présentant des fortes discontinuités dans
10 l'espace : $\psi(\mathbf{h}) = \sum_i \lambda_i \psi_i(\mathbf{h})$. Le critère régularisé minimisé s'écrit alors sous la forme $J(\mathbf{h}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{h}\|^2 + \psi(\mathbf{h})$ (3).

Les réponses impulsionnelles sont en effet supposées continues suivant i et j, et la réponse obtenue pour une couche de profondeur est supposée proche de celle obtenue pour une couche adjacente. $\psi_1(\mathbf{h})$
15 pénalise alors par exemple les solutions \mathbf{h} discontinues suivant i et j, $\psi_2(\mathbf{h})$ les solutions fournissant des réponses impulsionnelles trop différentes entre deux couches successives, etc.

Le poids accordé au terme de régularisation est fixé par l'ensemble des paramètres λ_i , appelés hyperparamètres du problème direct. Plus ces
20 paramètres sont faibles, plus la solution obtenue se rapproche de la solution des moindres carrés ordinaires, et à l'inverse, plus ces paramètres sont forts, moins l'adéquation aux données gérée par le terme de moindres carrés est prise en compte, et plus la solution se rapproche d'une solution nulle.

Il est à noter que les fonctions de régularisation $\psi_i(\mathbf{h})$ permettant de
25 former le critère régularisé sont choisies convexes, de telle sorte que le critère reste un critère convexe, présentant un minimum unique.

➤ Résolution du problème inverse :

Le problème d'estimation de \mathbf{x} correspondant au modèle (1) lorsque \mathbf{y} et H sont connus se pose de la même façon que le problème de l'estimation
30 de \mathbf{h} à \mathbf{x} et \mathbf{y} connus. Il est ainsi théoriquement possible de le résoudre par

minimisation du critère des moindres carrés fournissant l'estimée $\hat{\mathbf{x}}$:

$$\hat{\mathbf{x}} = \operatorname{Arg} \min_{\mathbf{x}} \mathbf{J}(\mathbf{x}), \text{ où } \mathbf{J}(\mathbf{x}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{Hx}\|^2.$$

5 Là encore, pour les mêmes raisons que celles mentionnées ci-dessus, l'inversion de la matrice $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$ permettant d'écrire la solution exacte de ce problème de minimisation peut être problématique.

Il est donc là aussi proposé de recourir à un « critère régularisé » permettant de prendre en compte des informations a priori sur la solution recherchée. Ces informations a priori explicitent le fait que le volume inspecté est composé principalement de zones homogènes (acier/défaut).

10 Le critère régularisé s'écrit sous la forme : $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{Hx}\|^2 + \varphi(\mathbf{x})$ (4), où $\varphi(\mathbf{x})$ est le terme de régularisation introduit pour pénaliser des solutions « chahutées » dans l'espace : a priori, le milieu est supposé homogène, et une discontinuité éventuelle sera très locale, l'ensemble de la solution recherchée étant homogène.

15 Le terme de régularisation $\varphi(\mathbf{x})$ peut également se décomposer en $\varphi(\mathbf{h}) = \sum_i \lambda_i \varphi_i(\mathbf{h})$, où les fonctions $\varphi_i(\mathbf{h})$ formalisent les différentes hypothèses de continuité faites, et où l'ensemble des hyperparamètres du problème inverse λ_i permettent de gérer l'importance accordée à ces termes de régularisation par rapport au terme d'adéquation aux données $\|\mathbf{y} - \mathbf{Hx}\|^2$.

20 Là encore, les fonctions de régularisation $\varphi_i(\mathbf{h})$ permettant de former le critère régularisé peuvent être choisies convexes, de telle sorte que le critère reste un critère convexe dont le minimum est unique.

25 On mentionne ici que l'invention, que ce soit pour la résolution du problème direct, ou celle du problème inverse, n'est aucunement limitée au recours à un algorithme de minimisation particulier. A titre d'exemples non limitatifs, on peut citer l'algorithme à gradients conjugués, avec préconditionnement ou encore une approche de type Geman et Yang (basée sur la résolution d'un critère augmenté).

➢ Choix des hyperparamètres

Les hyperparamètres intervenant dans les deux critères à minimiser (3) et (4) sont importants, dans la mesure où ils peuvent beaucoup influer sur la forme des solutions recherchées.

Ainsi, des valeurs très différentes d'hyperparamètres peuvent permettre 5 d'aboutir (lors de l'estimation des paramètres du modèle direct) à des réponses impulsionales de forme allant de variation rapide à très lente. De la même façon il est possible (lors de l'étape de résolution du problème inverse) d'obtenir des reconstructions de défauts ayant une forme plus ou moins connexe selon les trois directions (i, j, k).

10 Dans ce qui suit, le choix des hyperparamètres est fait « visuellement », en jugeant des différents résultats obtenus pour différentes valeurs d'hyperparamètres.

Ainsi, en ce qui concerne l'estimation des paramètres du modèle direct (réalisée lors de l'étape préliminaire), on cherche à la fois à obtenir une 15 solution lisse quelle que soit la couche concernée, et proche d'une mesure réelle dont on dispose.

Concernant la résolution du problème inverse, un choix d'hyperparamètres est fait dans un premier temps sur des défauts supposés connus, avec pour critère la reconstruction d'un défaut d'allure pleine, et 20 variant à peu près continûment entre les différentes couches de profondeur. Ces hyperparamètres sont ensuite fixés une fois pour toutes et utilisés sur l'ensemble des défauts à reconstruire. Cette manière de procéder permet d'aboutir à des résultats tout à fait concluants.

Bien entendu, des techniques de choix automatique d'hyperparamètres 25 connues (validation croisée généralisée, courbes en L, etc.) peuvent être utilisées dans le cadre de la présente invention. En particulier, ces techniques sont à même de permettre de s'affranchir d'une certaine subjectivité dans le choix visuel, et de s'épargner le temps passé à faire ce choix visuel.

30 □ Traitements monofréquence et multifréquence

On a fait état ci-dessus de jeux de mesures provenant d'une seule fréquence d'inspection de la sonde, la méthode exposée étant par la suite dénommée « monofréquence ».

Les différentes fréquences d'inspection étant censées apporter des informations complémentaires, il est également intéressant de caractériser la profondeur des défauts en utilisant simultanément les mesures provenant des différentes fréquences d'inspection disponibles.

5 Supposons que l'on dispose des mesures \mathbf{y}_i correspondant aux fréquences d'inspection f_i , pour i allant de 1 à F. Un mode de réalisation possible de l'invention consiste à mettre en œuvre un traitement dit « multiréquence » de la façon suivante.

La résolution du problème direct se fait dans le cadre monofréquence :
10 les réponses impulsionales \mathbf{h}_i correspondant à chaque fréquence d'inspection f_i sont estimées par minimisation du critère (3), en estimant pour chaque fréquence f_i la réponse impulsionnelle \mathbf{h}_i minimisant (3) avec \mathbf{y}_i et \mathbf{X} connus (\mathbf{X} est indépendant de la fréquence).

Dans un deuxième temps, la résolution du problème inverse se fait par
15 minimisation du critère modifié :

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = w_1 \|\mathbf{y}_1 - \mathbf{H}_1 \mathbf{x}\|^2 + w_2 \|\mathbf{y}_2 - \mathbf{H}_2 \mathbf{x}\|^2 + w_3 \|\mathbf{y}_3 - \mathbf{H}_3 \mathbf{x}\|^2 + \dots + \varphi(\mathbf{x}) \quad (5)$$

où les matrices \mathbf{H}_i correspondent aux réponses impulsionales \mathbf{h}_i mises sous forme matricielle, les « poids » w_i traduisent la confiance dans les mesures \mathbf{y}_i , ou la variance du bruit d'observation sur ces mesures. Ces poids
20 permettent par exemple de prendre en compte certaines mesures paraissant avoir un rapport signal sur bruit plus important à certaines fréquences qu'à d'autres, en leur accordant un poids plus faible.

Un terme $\varphi(\mathbf{x})$ de régularisation est utilisé, dont le rôle est le même que pour le traitement monofréquence.

25 3. Présentation des données utilisées

L'approche de reconstruction a notamment été évaluée sur des données réelles. On a utilisé à cet effet des maquettes présentant des entailles représentatives de la problématique, c'est-à-dire des défauts électro-érodés de profondeur inférieure à 5mm et de géométrie variée
30 (entailles rectangulaires, semi-circulaires (les fissures de fatigue pouvant avoir une forme semi-elliptique) et à section triangulaires (pour simuler les rayures)). Les maquettes en acier inoxydable permettent d'étudier la forme des réponses des sondes en fonction de différents paramètres

caractéristiques de la sonde (type, fréquence d'émission, entrefer), du matériau (teneur en ferrite) et des défauts étalons (longueur, profondeur, section transversale, section longitudinale).

Les données réelles utilisées ont ainsi été acquises sur des maquettes
5 (blocs d'acières) à l'aide de deux sondes (l'une à fonctions séparées, l'autre à fonctions communes (double fonction)) en considérant les défauts suivants :

- des entailles rectangulaires, de profondeur 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 mm, de longueur 15 et 20 mm, et de largeur 0.2 mm ;
- une entaille rectangulaire de profondeur 1 mm, de longueur 15 mm mais de largeur 0.1 mm ;
- une fissure de profondeur 3mm ;
- des entailles semi-circulaires de profondeur maximale 1, 3, 4 mm, de longueur 15mm, et de largeurs 0.1, 0.2 et 0.3 mm.

La présente description concerne uniquement les résultats obtenus sur
15 les données réelles. Il est toutefois important de noter que des résultats obtenus à partir de données simulées ainsi que de données de synthèse ont également permis de conclure au bon comportement du procédé selon l'invention.

4. Reconstruction en 2D

4.1. Spécificités de l'approche 2D

Le modèle d'observation est le modèle (1) décrit au point 2.3,
 $\mathbf{y} = \mathbf{Hx} + \mathbf{b}$, où \mathbf{y} contient les mesures effectuées, \mathbf{H} est la matrice des réponses impulsionales, \mathbf{x} est la conductivité relative et \mathbf{b} représente le bruit d'observation.

25 Dans cette première approche, l'ensemble des mesures et du milieu à reconstruire est supposé être contenu dans un même plan, d'où l'appellation 2D. Le défaut éventuellement présent est quant à lui supposé être contenu dans un plan infini perpendiculaire au plan du milieu considéré, cette hypothèse permettant de justifier l'écriture du modèle direct (1).

30 Les mesures obtenues \mathbf{y} ne sont donc indexées que par un indice (j), et le milieu est indexé par deux indices (j et k).

Une hypothèse simplificatrice est par ailleurs faite sur la matrice \mathbf{H} . On rappelle ici que la matrice \mathbf{H} est construite à partir des réponses

impulsionnelles du milieu, qui se définissent comme la mesure recueillie par la sonde lorsqu'un défaut ponctuel se trouve successivement en chaque pixel du milieu discrétilisé (un défaut ponctuel situé en (j,k) se formalise par $X(j,k)=1$ et $X(m,n)=0$ pour $m \neq j$ et $n \neq k$). L'hypothèse simplificatrice faite

5 sur H consiste à supposer que la réponse impulsionnelle s'obtient par translation latéralement mais varie en fonction de la profondeur. Plus précisément, cette hypothèse se traduit simplement par le fait que la réponse impulsionnelle correspondant à un défaut ponctuel situé en (j_0+j_1,k) est obtenue par un décalage de j_1 échantillons selon j de la réponse impulsionnelle correspondant au défaut ponctuel situé à la même profondeur en (j_0,k) : il n'y a donc qu'une réponse impulsionnelle à estimer par couche de profondeur. Si le milieu est discrétilisé en K couches de profondeur, la matrice H est donc formée à partir des éléments de K réponses impulsionnelles.

10

15 4.2. Estimation des réponses impulsionnelles (paramètres du modèle direct)

La résolution du problème direct, c'est-à-dire l'estimation des réponses impulsionnelles contenues dans la matrice H , se fait en minimisant le critère (3), $J(\mathbf{h}) = \|y - X\mathbf{h}\|^2 + \psi(\mathbf{h})$, comme cela a déjà été présenté au point 2.3.

20 Dans le cadre de l'approche 2D, le terme de régularisation $\psi(\mathbf{h})$ peut s'écrire sous la forme $\psi(\mathbf{h}) = \lambda_0 \psi_0(\mathbf{h}) + \lambda_1 \psi_1(\mathbf{h}) + \lambda_2 \psi_2(\mathbf{h})$, où :

- $\psi_0(\mathbf{h})$ est un terme de « rappel à zéro » pénalisant des solutions de norme trop grande, dont l'une des fonctions est d'assurer une stabilité numérique de la solution ;
 - $\psi_1(\mathbf{h})$ pénalise les gros écarts (selon k) entre réponses impulsionnelles voisines selon la profondeur (deux réponses impulsionnelles pour des couches voisines sont a priori relativement proches) ;
 - $\psi_2(\mathbf{h})$ pénalise les gros écarts (selon j) entre points voisins au sein de chacune des K réponses impulsionnelles correspondant aux K couches de profondeur (il s'agit d'un a priori de « douceur » de la réponse impulsionnelle pour une profondeur fixée).
- 25
- 30

Un exemple de terme de régularisation $\psi(\mathbf{h})$ sera donné plus loin dans la présente description, en relation avec l'approche 3D.

4.3. Résolution du problème inverse

La résolution du problème inverse, c'est-à-dire l'estimation de la variation de conductivité X , se fait en minimisant le critère (4) :

$$J(\mathbf{x}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{Hx}\|^2 + \varphi(\mathbf{x}), \text{ comme présenté au point 2.3.}$$

Dans le cadre de l'approche 2D, le terme de régularisation $\varphi(\mathbf{h})$ peut s'écrire sous la forme $\varphi(\mathbf{x}) = \lambda_0 \varphi_0(\mathbf{x}) + \lambda_1 \varphi_1(\mathbf{x}) + \lambda_2 \varphi_2(\mathbf{x})$, où :

- $\varphi_0(\mathbf{x})$ est un terme de rappel à zéro, dont la fonction principale est d'éviter des problèmes d'instabilité numérique ;
- $\varphi_1(\mathbf{x})$ pénalise les gros écarts (selon j) de conductivité entre points voisins (la conductivité est a priori constituée de zones homogènes) ;
- $\varphi_2(\mathbf{x})$ pénalise les gros écarts (selon k) entre profondeurs voisines (pour la même raison).

Un exemple de terme de régularisation $\varphi(\mathbf{h})$ sera donné plus loin dans la présente description, en relation avec l'approche 3D.

4.4. Résultats de reconstruction en 2D pour le traitement de données réelles : reconstruction d'entailles rectangulaires

□ Présentation des données

Les données réelles sur lesquelles la reconstruction a été ici étudiée ont été acquises à l'aide d'une sonde à fonctions séparées, aux fréquences d'inspection de 100, 300 et 1 MHz, sur une maquette (de type bloc d'acier) comportant des entailles rectangulaires de profondeur 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, et 7 mm, de largeur 0.2 mm. Le pas d'acquisition des mesures est de 0.2mm.

La figure 2 représente l'allure des mesures obtenues sur les défauts de profondeur 1 mm et 6mm, aux différentes fréquences d'inspection.

□ Estimation des réponses impulsionales (paramètres du modèle direct)

Les réponses impulsionales sont estimées pour des couches successives de 0.5 mm de profondeur. La réponse impulsionnelle estimée pour la troisième couche représente ainsi une estimation de la mesure obtenue pour un défaut « ponctuel » situé entre 1 et 1.5 mm de profondeur

dans le bloc d'acier. L'estimation est faite pour des profondeurs allant jusqu'à 8mm, soit 16 couches de 0.5 mm.

On mentionne ici, que pour se placer dans un cadre réaliste, dans lequel on ne connaît pas a priori la taille des défauts que l'on cherche à dimensionner, il est possible de n'utiliser qu'une partie des mesures pour faire une estimation des réponses impulsionales à toutes les profondeurs. Les méthodes d'estimation développées sont alors ensuite testées sur les mesures non utilisées pour l'estimation des réponses impulsionales.

Le tableau ci-dessous illustre une possibilité d'estimation de h et de x (les croix représentant l'utilisation des acquisitions correspondant aux défauts pour l'estimation de h (réponse impulsionnelle) ou de x (défaut)).

Acquisitions pour des défauts de profondeur :	0.5 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm
estimation de h	x		x	X	x	x		x
estimation de x		x					x	

On a représenté sur la figure 3 les réponses impulsionales estimées pour les profondeurs de 0.5 à 1 mm, et de 6.5 à 7 mm à l'aide du jeu de données reporté dans le tableau ci-dessus et correspondant aux acquisitions faites sur les défauts de profondeur 0.5, 2, 3, 4, 5 et 7 mm.

Résultats de reconstruction (résolution du problème inverse)

Nous présentons ici les résultats de reconstruction obtenus :

- par un traitement monofréquence (pour chacune des fréquences 100 kHz, 300kHz et 1MHz)
- 20 - par un traitement multifréquence utilisant simultanément les trois fréquences d'inspection.

Les résultats correspondant aux réponses impulsionales estimées à partir du jeu présenté ci-dessus correspondant aux défauts de profondeur 0.5, 2, 3, 4, 5 et 7 mm sont présentés sur la figure 4, pour un défaut de profondeur 1 mm.

Sur cette figure 4, on a représenté, de haut en bas :

- le défaut réel ;
- le milieu correspondant reconstruit en monofréquence à l'aide des réponses impulsionales estimées pour les mesures à 100 kHz ;

- le milieu correspondant reconstruit en monofréquence à l'aide des réponses impulsionales estimées pour les mesures à 300 kHz ;
- le milieu correspondant reconstruit en monofréquence à l'aide de la réponse impulsionnelle estimée pour les mesures à 1 MHz ;
- 5 - le milieu correspondant reconstruit en multifréquence à l'aide des réponses impulsionales estimées pour les trois fréquences ;

En ce qui concerne la reconstruction du défaut de profondeur 1 mm (cf. figure 4), les deux méthodes de reconstruction (monofréquence, multifréquence) fournissent des résultats intéressants. La profondeur du 10 défaut est ainsi correctement estimée avec ces méthodes, et cela quelle que soit la fréquence utilisée pour le traitement monofréquence. On constate toutefois une amélioration de la reconstruction par la méthode multifréquence, qui se traduit par une meilleure précision sur la taille du défaut.

15 On notera que l'apport du traitement multifréquence est net sur ces figures, les reconstructions obtenues étant plus précises pour la méthode multifréquence que pour n'importe quelle reconstruction monofréquence.

Ces résultats sont par ailleurs d'autant plus intéressants que les mesures aux différentes fréquences fournies sont très proches en amplitude. 20 On attend en effet encore plus de la reconstruction multifréquence lorsque les mesures aux différentes fréquences utilisées sont très distinctes. En effet, l'utilisation de mesures de même amplitude et même allure correspond à une redondance d'information, alors que des mesures très distinctes apportent vraisemblablement chacune une quantité d'information supplémentaire 25 utilisable dans la méthode multifréquence.

La même démarche a été appliquée pour la reconstruction d'entailles semi-circulaires ainsi que pour des entailles de type fissure.

Les résultats sont également probants. On a à cet effet représenté sur la figure 5 un exemple de reconstruction obtenu sur une entaille semi-circulaire de profondeur 3 mm, dans le cadre d'un traitement multifréquence, 30 à partir de la réponse impulsionnelle estimée à l'aide de mesures prises au centre de l'entaille et au bord de l'entaille. On a par ailleurs représenté sur la figure 6 un exemple de reconstruction obtenu sur une fissure de profondeur 3

mm, dans le cadre d'un traitement multifréquence, à partir de la réponse impulsionnelle estimée à l'aide de mesures prises au centre de la fissure.

5. Résultats de reconstructions 3D

L'ensemble des résultats de reconstruction obtenus sous l'hypothèse 5 « 3D », selon laquelle le problème est entièrement modélisé en 3 dimensions, est présenté dans cette section. Le modèle direct est donc dorénavant un modèle 3D.

5.1. Hypothèses liées à l'approche 3D

Le principe de l'acquisition est là encore identique à celui présenté sur 10 la figure 1. Le milieu étudié (à reconstruire) est discrétré en voxels, par exemple de dimensions (0.2, 0.2, 0.5) mm selon les directions (i,j,k) correspondant respectivement aux deux directions horizontales et à la profondeur du milieu. Comme déjà mentionné précédemment, on a défini la direction horizontale i comme celle selon laquelle le défaut s'étend (longueur 15 du défaut selon cette direction).

Les acquisitions \mathbf{y} sont des mesures comportant deux dimensions (selon i et j), comme précédemment. Le milieu à reconstruire (pour lequel on cherche à estimer les conductivités relatives) a été discrétré par pas de 0.5 mm selon la profondeur k, et par pas de 0.2 mm (correspondant au pas 20 d'acquisition des mesures) selon les deux directions horizontales i et j. Les conductivités relatives sont estimées en i et j sur tout le support correspondant aux acquisitions (même taille en i et j que les acquisitions), et selon k sur 16 couches de profondeur, correspondant à un milieu de 8mm de profondeur.

25 L'extension de la méthode à l'hypothèse 3D se fait naturellement, en minimisant les mêmes expressions que celles données dans le cadre 2D, pour l'estimation de la matrice \mathbf{H} des réponses impulsionnelles dans un premier temps, puis pour l'estimation de la conductivité relative du milieu en chaque voxel dans un deuxième temps. La différence avec l'approche précédente apparaît naturellement dans la taille et la structure des matrices 30 en jeu, ainsi que dans l'ajout d'un terme complémentaire pour la régularisation.

Le modèle d'observation s'écrit donc toujours sous la forme :

$\mathbf{y} = \mathbf{Hx} + \mathbf{b}$. Les mesures obtenues, formant le vecteur \mathbf{y} , sont indexées par deux indices (i,j), le milieu (i.e. la conductivité relative formant le vecteur \mathbf{x}) est indexé par trois indices (i,j,k), et les réponses impulsionales à partir desquelles on construit la matrice \mathbf{H} sont indexées par trois indices (i,j,k) par hypothèse.

Comme en 2D, il est supposé que les réponses impulsionales sont invariantes latéralement pour une profondeur donnée : elles peuvent donc être indexées par le numéro de la couche de profondeur correspondante sous la forme $h_k(i,j)$, cette quantité représentant alors la réponse sur la surface du matériau à un défaut ponctuel situé à la profondeur k.

5.2. Estimation des paramètres du problème direct

L'estimation des réponses impulsionales contenues dans la matrice \mathbf{H} (ou dans le vecteur \mathbf{h}) se fait en minimisant le critère modifié $J(\mathbf{h}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{Xh}\|^2 + \psi(\mathbf{h})$, comme expliqué au point 2.3. Dans le cadre de l'approche 3D, le terme de régularisation $\psi(\mathbf{h})$ s'écrit sous la forme $\psi(\mathbf{h}) = \lambda_0 \psi_0(\mathbf{h}) + \lambda_1 \psi_1(\mathbf{h}) + \lambda_2 \psi_2(\mathbf{h}) + \lambda_3 \psi_3(\mathbf{h})$, où :

- $\psi_0(\mathbf{h})$ est un terme de « rappel à zéro » pénalisant des solutions de norme trop grande, dont l'une des fonctions est d'assurer une stabilité numérique de la solution ;
- $\psi_1(\mathbf{h})$ et $\psi_2(\mathbf{h})$ pénalisent les gros écarts respectivement selon i et j entre points voisins au sein de chacune des K réponses impulsionales correspondant aux K couches de profondeur (a priori de douceur de la réponse impulsionnelle pour une profondeur fixée) ;
- $\psi_3(\mathbf{h})$ pénalise les gros écarts selon k entre réponses impulsionales voisines selon la profondeur au sein de chacune des K réponses impulsionales correspondant aux K couches de profondeur (deux réponses impulsionales pour des couches voisines sont a priori relativement proches).

Les réponses impulsionales à estimer comportent naturellement trois dimensions : une réponse impulsionnelle 2D sur une couche de profondeur k

correspond théoriquement à l'estimation de la mesure 2D qui serait faite si un défaut ponctuel était placé sur cette couche de profondeur.

Un exemple de critère modifié par ajout d'un terme de régularisation est le suivant :

$$5 \quad J(h) = \|y - Xh\|^2 + \lambda \left(v_0 \sum_{(i,j,k)} \psi(h_{i,j,k}) + v_1 \sum_{(i,j,k)} \psi(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + v_2 \sum_{(i,j,k)} \psi(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + v_3 \sum_{(i,j,k)} \psi(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \right),$$

par exemple avec $\psi(h) = h^2$, soit :

$$J(h) = \|y - Xh\|^2 + \lambda \left(v_0 \|h\|^2 + v_1 \sum_{(i,j,k)} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})^2 + v_2 \sum_{(i,j,k)} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})^2 + v_3 \sum_{(i,j,k)} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})^2 \right).$$

Dans ces équations, le terme $\|y - Xh\|^2$ est un terme d'adéquation aux données, et pour le terme de régularisation, le premier terme est un terme de rappel à zéro et les trois autres termes pénalisent dans l'ordre de fortes différences selon i, selon j et selon k. L'objectif est ici d'obtenir une solution douce dans les trois directions.

5.3. Résolution du problème inverse

L'estimateur de la conductivité relative est défini comme le minimiseur 15 du critère modifié J suivant, dépendant des données y et d'informations a priori sur la conductivité : $J(x) = \|y - Hx\|^2 + \varphi(x)$.

Dans le cadre de l'approche 3D, le terme de régularisation φ se décompose sous la forme $\varphi(h) = \lambda_0 \varphi_0(h) + \lambda_1 \varphi_1(h) + \lambda_2 \varphi_2(h) + \lambda_3 \varphi_3(h)$, où :

- $\varphi_0(x)$ est un terme de rappel à zéro, dont la fonction est principalement 20 d'éviter des problèmes d'instabilité numérique, mais aussi de pénaliser les valeurs non nulles de x (le composant est a priori constitué principalement de métal) ;
- $\varphi_1(x)$ et $\varphi_2(x)$ pénalisent les gros écarts (respectivement selon i et j) de conductivité entre points voisins (la conductivité est a priori constituée de zones homogènes) ;
- $\varphi_3(x)$ pénalise les gros écarts (selon k) entre profondeurs voisines (pour la même raison).

Un exemple de critère modifié par ajout d'un terme de régularisation est le suivant :

$$J(x) = \|y - Hx\|^2 + \lambda \left(v_0 \sum_{(i,j,k)} \varphi(x_{i,j,k}) + v_1 \sum_{(i,j,k)} \varphi(x_{i+1,j,k} - x_{i,j,k}) + v_2 \sum_{(i,j,k)} \varphi(x_{i,j+1,k} - x_{i,j,k}) + v_3 \sum_{(i,j,k)} \varphi(x_{i,j,k+1} - x_{i,j,k}) \right),$$

par exemple avec $\varphi(x) = \sqrt{\delta^2 + x^2}$.

Dans ces équations, le terme $\|y - Hx\|^2$ est un terme d'adéquation aux données, et pour le terme de régularisation, le premier terme est un terme de rappel à zéro et les trois autres termes pénalisent dans l'ordre de fortes différences selon i, selon j et selon k.

L'objectif est ici la restauration de zones homogènes avec préservation de discontinuités. Les fortes différences sont ainsi moins pénalisées lors de l'étape de reconstruction (résolution du problème inverse) de manière à retrouver des discontinuités éventuelles. Les zones homogènes sont toutefois favorisées (minimum du critère en zéro).

En variante, il est possible de prendre en compte le caractère binaire de la solution recherchée. Les conductivités relatives sont effectivement a priori composées de 0 (absence de défaut) ou de 1 (présence de défaut), et, pour assurer des résultats de bonne qualité, on peut donc introduire cette information dans le critère à minimiser, par exemple selon :

$$J(x) = \|y - Hx\|^2 + \lambda \left(v_0 \sum_{(i,j,k)} \tilde{\varphi}(x_{i,j,k}) + v_1 \sum_{(i,j,k)} \varphi(x_{i+1,j,k} - x_{i,j,k}) + v_2 \sum_{(i,j,k)} \varphi(x_{i,j+1,k} - x_{i,j,k}) + v_3 \sum_{(i,j,k)} \varphi(x_{i,j,k+1} - x_{i,j,k}) + v_4 \sum_{(i,j,k)} \tilde{\varphi}(x_{i,j,k} - 1) \right)$$

où le premier terme du terme de régularisation est un terme de rappel à zéro et le dernier terme est un terme de rappel à 1, avec par exemple

$$\tilde{\varphi}(u) = \varphi(u) + \eta(\mu - \sqrt{\mu^2 + u^2}).$$

On mentionne que dans un tel cas de figure, le critère à minimiser n'est pas convexe.

5.4. Présentation générale des données utilisées dans le cadre de la reconstruction 3D

Les mesures utilisées ici sont les mêmes que celles utilisées dans le cadre 2D, à savoir des acquisitions réalisées à l'aide de la sonde à fonctions communes (double fonction) et de la sonde à fonctions séparées sur des entailles rectangulaires et semi-circulaires. La fréquence d'inspection 300 kHz est utilisée pour les deux sondes. Enfin, pour l'ensemble des

reconstructions présentées ici, les réponses impulsionales ont été estimées à l'aide des acquisitions effectuées sur les entailles rectangulaires de longueur 15mm, de largeur 0.2 mm et de profondeur 1, 3 et 6mm. Il sera par ailleurs fait état, dans le cas de l'utilisation de la sonde à fonctions communes, d'une reconstruction effectuée à l'aide des RI estimées sur les acquisitions effectuées sur les entailles rectangulaires de longueur 15mm, de largeur 0.2 mm et de profondeur 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 et 6mm.

5.5. Résultats de reconstruction 3D pour le traitement de données réelles provenant du capteur à fonctions communes

- 10 **Présentation des données**
 - **Données utilisées pour l'étape d'estimation des réponses impulsionales**

Les mesures utilisées sont les mesures acquises à l'aide de la sonde à fonctions communes à la fréquence 300 kHz sur la maquette contenant des entailles rectangulaires de longueur 15 mm, de largeur 0.2 mm et de profondeurs 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 mm.

Un jeu de réponses impulsionales a été estimé à partir d'un jeu de données constitué des acquisitions faites sur les défauts de profondeur 1, 3 et 6 mm (entailles rectangulaires, longueur 15 mm ; largeur 0.2 mm).

- 20 **Données utilisées pour l'étape de reconstruction**

Toutes les acquisitions utilisées pour l'étape de reconstruction correspondent aux acquisitions obtenues à la fréquence 300 kHz. Les reconstructions ici présentées concernent :

- 25
 - deux entailles rectangulaires, de longueur 15mm, de largeur 0.2mm, et de profondeur 1 et 3mm ;
 - deux entailles rectangulaires de longueur 20mm, de largeur 0.2mm, et de profondeur 1 et 3mm ;
 - deux entailles semi-circulaires de longueur 15mm, de largeur 0.2 mm et de profondeur maximale 1 et 3m ;
- 30
 - une entaille rectangulaire de longueur 15mm, de largeur 0.1 mm et de profondeur 1mm ;
 - une entaille rectangulaire de longueur 15mm, de largeur 0.2 mm, et de profondeur 0.5mm ;

- une entaille semi-circulaire de longueur 15mm, largeur 0.3 mm et profondeur maximale 3mm.

Estimation des réponses impulsionales (paramètres du modèle direct)

5 On rappelle que chaque matrice de réponses impulsionales est une matrice 3D, permettant de donner, pour chaque couche de profondeur, la réponse 2D correspondant à un défaut ponctuel situé à cette profondeur.

On a représenté sur la figure 7 les réponses impulsionales estimées pour les couches de profondeur 0 à 0.5 mm (1ère couche), 0.5 à 1 mm
10 (2ème couche), et 3 à 3.5 mm (7ème couche), pour les estimations correspondant au jeu de données mentionné ci-dessus.

Résultats de reconstruction (résolution du problème inverse)

Les figures 8 et 9 représentent deux exemples de résultats obtenus pour l'ensemble des défauts reconstruits à l'aide de la réponse
15 impulsionale estimée.

La figure 8 représente la reconstruction du milieu contenant l'entaille rectangulaire de longueur 15 mm, de largeur 0.2 mm et de profondeur 3 mm.

La figure 9 représente la reconstruction du milieu contenant l'entaille rectangulaire de longueur 15 mm, de largeur 0.2 mm et de profondeur 0.5
20 mm.

Pour chacun des défauts étudiés, les figures 8 et 9 représentent:

- un zoom sur une coupe longitudinale (dans la longueur du défaut) du milieu reconstruit (de la conductivité relative estimée) ;
- un zoom sur une coupe transversale (traversant le défaut) du milieu reconstruit ;
- une coupe horizontale (« vue du dessus ») du milieu reconstruit correspondant à l'estimation de la conductivité relative sur la première couche de profondeur.

L'ensemble des échelles horizontales et verticales est en mm.

30 On rappelle que les voxels ne sont pas cubiques, puisque leur dimension est de 0.2mm dans les deux directions horizontales, et de 0.5mm dans la direction verticale. Les figures 8 et 9 ne tiennent pas compte de cette différence d'échelle : tous les pas de discréétisation ont alors la même

dimension et les défauts reconstruits prennent donc une allure plus large qu'ils ne l'ont en réalité.

Les résultats obtenus sur la sonde à fonctions communes (double fonction) sont performants. Une évaluation des résultats obtenus sur chacun 5 des défauts est présentée dans le tableau suivant.

Défaut	Type	Profondeur (P, en mm)	Longueur (L, en mm)	Largeur (l, en mm)	Profondeur estimée (mm)	Longueur estimée
Défaut 1	Rectangulaire	1	15	0.2	~1	~15
Défaut 2	Rectangulaire	3	15	0.2	~2.5	~15
Défaut 3	Rectangulaire	1	20	0.2	~1	~20
Défaut 4	Rectangulaire	3	20	0.2	~3	~20
Défaut 4	Rectangulaire	3	20	0.2	~2.5	~20
Défaut 5	Semi-circulaire	1	15	0.2	~1	~10
Défaut 6	Semi-circulaire	3	15	0.2	~2	~12
Défaut 7	Rectangulaire	1	15	0.1	~1.5	~14
Défaut 8	Rectangulaire	0.5	15	0.2	~1	~14
Défaut 9	Semi-circulaire	3	15	0.3	~1.5	~14
Défaut 10	Rectangulaire	4	15	0.2	~3.5	~15

5.6. Résultats de reconstruction 3D pour le traitement de données réelles provenant du capteur à fonctions séparées

Données utilisées pour l'étape d'estimation des réponses impulsionales

10 Les mesures utilisées sont les mesures effectuées à l'aide de la sonde à fonctions séparées à la fréquence 300 kHz sur la maquette présentant des entailles rectangulaires de longueur 15 mm, de largeur 0.2 mm et de profondeur 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 mm.

15 Un jeu de réponses impulsionales a été estimé à partir des défauts de profondeur 1, 3 et 6 mm (entailles rectangulaires de longueur 15mm et de largeur 0.2 mm).

Données utilisées pour l'étape de reconstruction

Toutes les acquisitions utilisées pour l'étape de reconstruction correspondent aux acquisitions obtenues à la fréquence 300 kHz. Les

reconstructions ici présentées concernent les mêmes défauts que dans le cadre du capteur à fonctions communes (excepté pour le défaut 11)

Estimation des réponses impulsionales (paramètres du modèle direct)

5 On a représenté sur la figure 10 les réponses impulsionales estimées pour les couches de profondeur 0 à 0.5 mm (1ère couche), et 3 à 3.5 mm (7ème couche).

Résultats de reconstruction (résolution du problème inverse)

La figure 11 présente les résultats obtenus pour la reconstruction d'une
10 entaille de longueur 20mm, de largeur 0,2mm et de profondeur 3 mm.

Les résultats obtenus sur la sonde à fonctions séparées sont là encore encourageants. Dans le tableau qui suit, une évaluation des estimations obtenues sur chacun des défauts est présentée.

Défaut	Type	Profon- deur (P, en mm)	Longueur (L, en mm)	Largeur (l, en mm)	Profondeur estimée (mm)	Longueur estimée
Défaut 1	Rectan- gulaire	1	15	0.2	~1-1.5	~12
Défaut 2	Rectan- gulaire	3	15	0.2	~1.5	~12
Défaut 3	Rectan- gulaire	1	20	0.2	~1.5	~20
Défaut 4	Rectan- gulaire	3	20	0.2	~2.5	~20
Défaut 5	Semi- circulaire	1	15	0.2	~1.5	~10
Défaut 6	Semi- circulaire	3	15	0.2	~1.5-2	~12
Défaut 7	Rectan- gulaire	1	15	0.1	~1-1.5	~12
Défaut 8	Rectan- gulaire	0.5	15	0.2	~0.5	~8
Défaut 9	Semi- circulaire	3	15	0.3	~1.5	~12
Défaut 10	Rectan- gulaire	4	15	0.2	~2.5-3	~15

REVENDICATIONS

1. Procédé d'inspection d'un composant métallique (1) pour caractérisation des défauts débouchant (Dd) en surface, dans lequel on réalise des mesures par une sonde (2) de contrôle à courants de Foucault déplacée à la surface du composant métallique (1), caractérisé en ce qu'il comporte les étapes consistant à :
 - évaluer les variations de conductivité au sein du composant métallique à partir des mesures réalisées par la sonde, et
 - déterminer une caractérisation des défauts débouchant (Dd) à partir de ladite évaluation des variations de conductivité.
2. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce qu'il comporte une étape préliminaire visant à estimer les caractéristiques du composant métallique devant être inspecté, ladite étape préliminaire comprenant l'opération consistant à réaliser des mesures des courants induits par le déplacement de la sonde à la surface d'une maquette en un matériau possédant des caractéristiques proches de celles du composant inspecté, la maquette présentant au moins un défaut étalon de caractérisation connue de sorte que les variations de conductivité au sein de la maquette sont connues.
3. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le défaut étalon est de type rectangulaire ou semi-circulaire.
4. Procédé selon l'une des deux revendications précédentes, dans lequel on considère une relation linéaire entre les mesures des courants de Foucault induits à la surface d'un milieu et la conductivité au sein dudit milieu, un jeu de réponses impulsionales du milieu représentant ainsi l'ensemble des variations des courants de Foucault lorsqu'un défaut ponctuel se trouve successivement en chaque point dudit milieu, le procédé étant caractérisé en ce que l'étape préliminaire comporte en outre l'opération consistant à estimer le jeu de réponses impulsionales du

composant métallique inspecté à partir desdites mesures sur la maquette présentant au moins un défaut étalon.

5. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la relation linéaire s'exprime selon $\mathbf{y} = \mathbf{Hx} + \mathbf{b}$, où \mathbf{y} désigne les mesures des courants induits, \mathbf{x} la conductivité relative au sein du milieu, \mathbf{H} la matrice des réponses impulsionales dudit milieu et \mathbf{b} le bruit, et en ce que ladite étape préliminaire consiste à estimer la matrice \mathbf{H} à partir des mesures \mathbf{y} réalisées sur ladite maquette de conductivité \mathbf{x} connue.

10

6. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'estimation $\hat{\mathbf{h}}$ de la réponse impulsionale est obtenue par minimisation du critère des moindres carrés modifié par ajout d'un terme de régularisation $\psi(\mathbf{h})$ représentatif d'informations a priori sur la quantité $\hat{\mathbf{h}}$ à estimer, l'estimation étant ainsi obtenue selon $\hat{\mathbf{h}} = \text{Arg min}_{\mathbf{h}} \mathbf{J}(\mathbf{h})$, où $\mathbf{J}(\mathbf{h}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{Xh}\|^2 + \psi(\mathbf{h})$, \mathbf{X} étant une matrice construite à partir des valeurs connues de conductivité de la maquette.

20 7. Procédé selon l'une des revendications 4 à 6, caractérisé en ce que l'évaluation des variations de conductivité au sein du composant métallique inspecté consiste à déterminer la conductivité \mathbf{x} à partir des mesures \mathbf{y} réalisées lors de l'inspection du composant métallique, et de la matrice \mathbf{H} estimée au cours de l'étape préliminaire.

25 8. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce qu'une estimation $\hat{\mathbf{x}}$ de la conductivité relative permettant l'évaluation des variations de conductivité est obtenue par minimisation du critère des moindres carrés modifié par ajout d'un terme de régularisation $\varphi(\mathbf{x})$ représentatif d'informations a priori sur la quantité $\hat{\mathbf{x}}$ à estimer, l'évaluation étant ainsi obtenue selon $\hat{\mathbf{x}} = \text{Arg min}_{\mathbf{x}} \mathbf{J}(\mathbf{x})$, où $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \|\mathbf{y} - \mathbf{Hx}\|^2 - \varphi(\mathbf{x})$.

9. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la caractérisation d'un défaut débouchant consiste à fournir la localisation, longueur, largeur et profondeur d'un parallélogramme représentant ledit défaut.

5

10. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'une seule fréquence d'inspection de la sonde est prise en compte.

10

11. Procédé selon l'une des revendications 1 à 10, caractérisé en ce qu'une pluralité de fréquences d'inspection de la sonde est prise en compte, de sorte que :

15

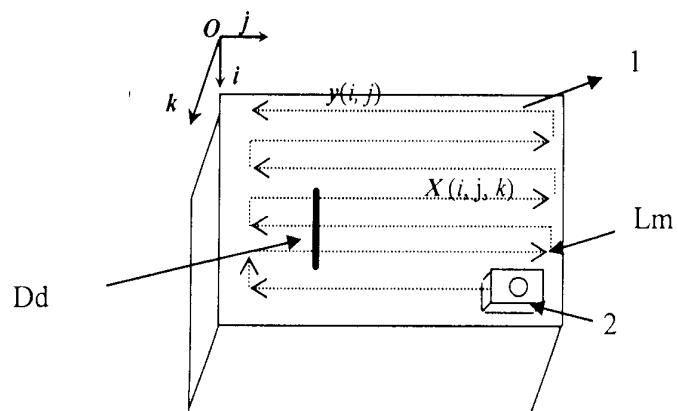
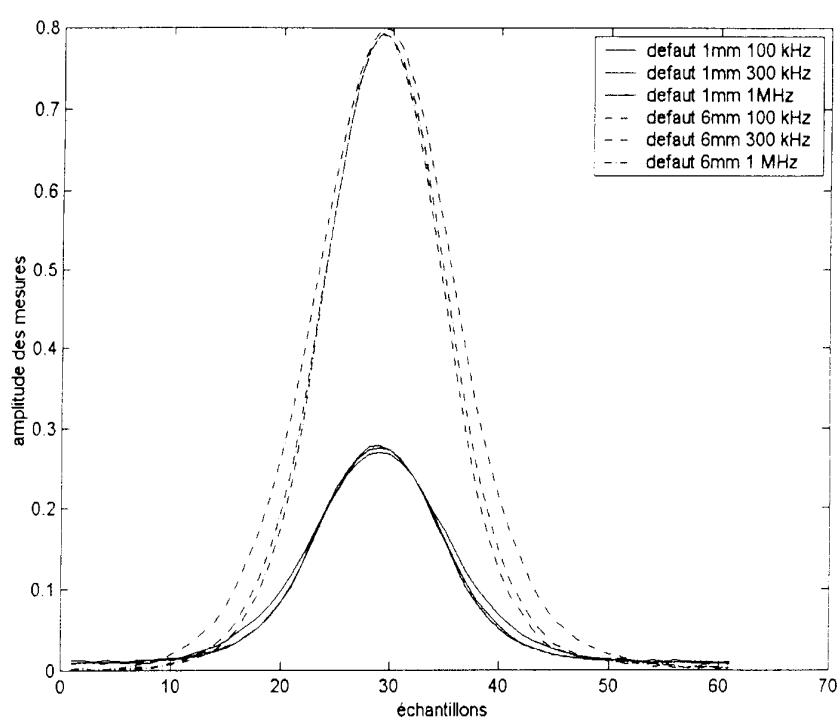
- lors de l'étape préliminaire, on estime la réponse impuls onnelle h_i du composant inspecté à chacune des fréquences d'inspection f_i par minimisation du critère modifié défini à la revendication 6, en utilisant les mesures y_i à la fréquence f_i et la conductivité x connue de la maquette,
- et lors de l'étape d'évaluation des variations de conductivité au sein du composant métallique inspecté, on minimise le critère modifié, $J(x) = w_1 \|y_1 - H_1 x\|^2 + w_2 \|y_2 - H_2 x\|^2 + w_3 \|y_3 - H_3 x\|^2 + \dots + \varphi(x)$, où w_i est un poids associé à la prise en compte de la fréquence f_i et $\varphi(x)$ est un terme de régularisation tel que défini à la revendication 8.

20

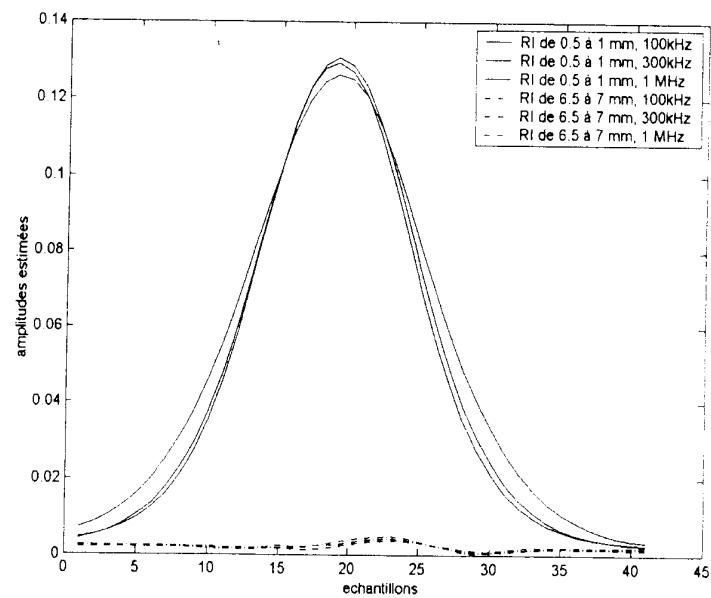
25

12. Système d'inspection d'un composant métallique (1) pour caractérisation des défauts débouchants (Dd) en surface, caractérisé en ce qu'il comporte une sonde (2) de contrôle à courants de Foucault apte à être déplacée à la surface du composant métallique pour réaliser des mesures des courants induits, ainsi que des moyens de traitement adaptés pour mettre en œuvre le procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes.

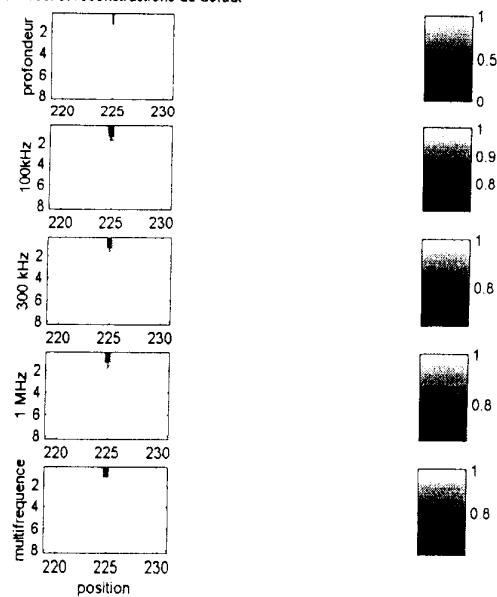
1 / 6

FIG. 1FIG. 2

2 / 6

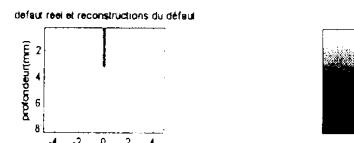
FIG.3

defaut réel et reconstructions du defaut

FIG.4

3 / 6

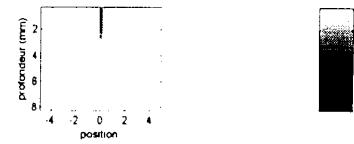
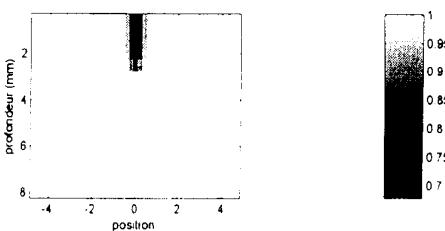
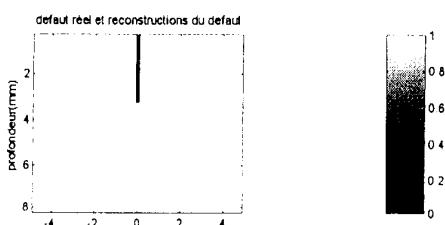
Coupe idéale centre



Reconstruction au centre



Reconstruction au bord

FIG.5FIG.6

4 / 6

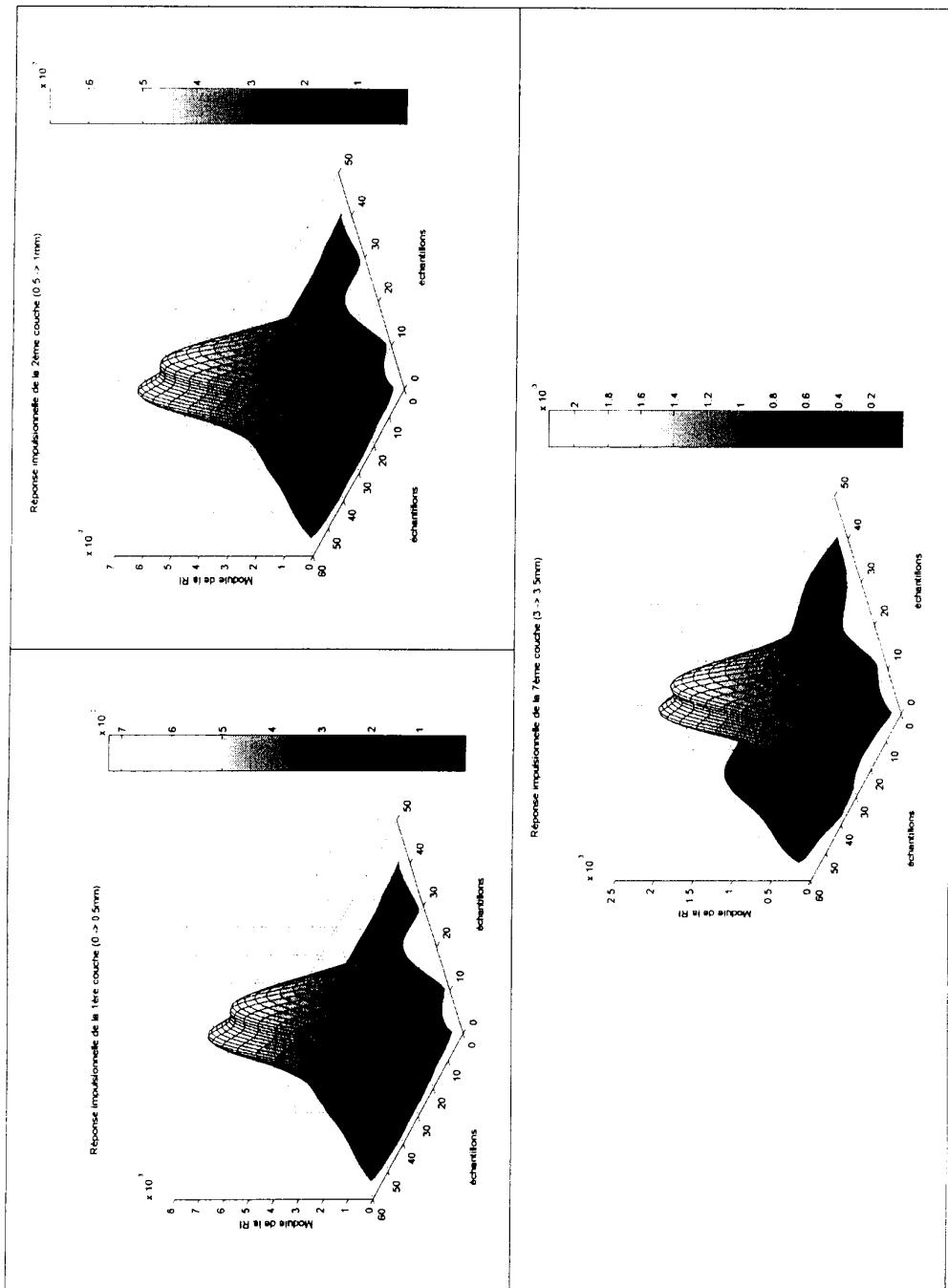
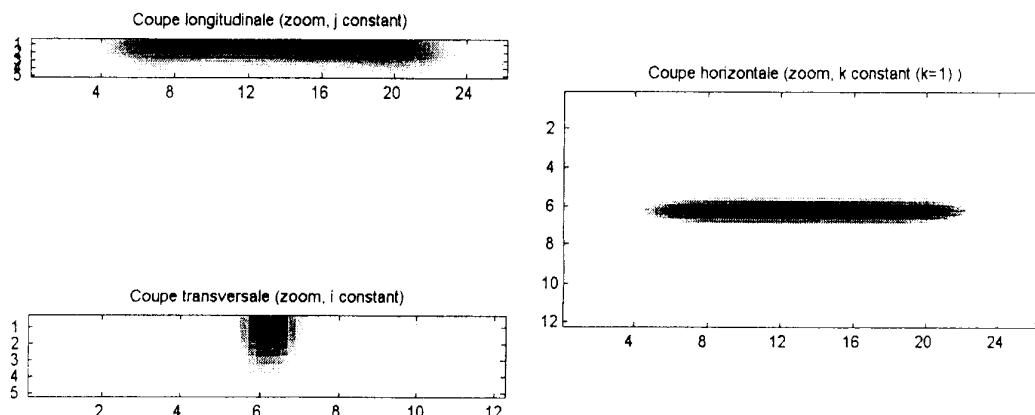
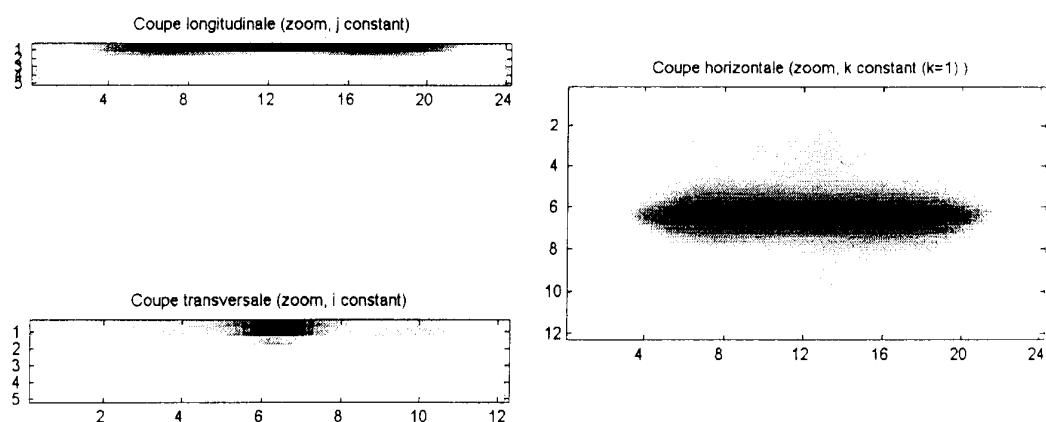
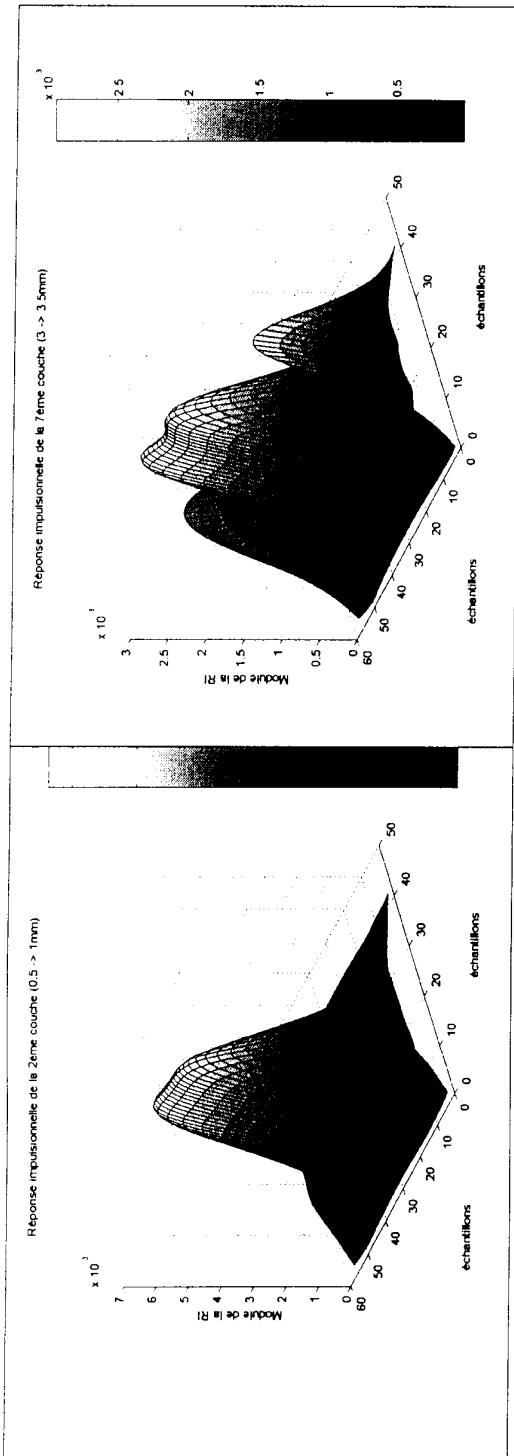
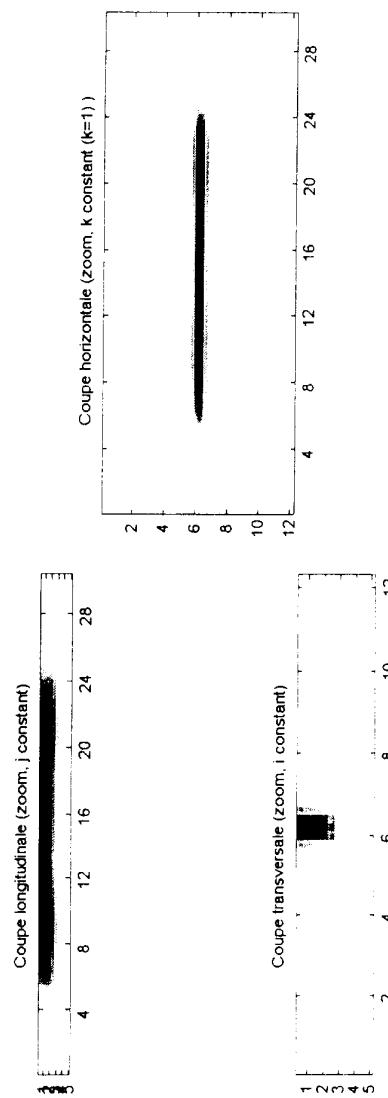


FIG. 7

5 / 6

Reconstruction du milieu contenant l'entaille rectangulaire, $L=15\text{mm}$, $P=3\text{mm}$, $I=0.2\text{mm}$ FIG_8Reconstruction du milieu contenant l'entaille rectangulaire, $L=15\text{mm}$, $P=0.5\text{mm}$, $I=0.2\text{mm}$ FIG_9

6 / 6

FIG_10Reconstruction du milieu contenant l'entaille rectangulaire. $L=20\text{mm}$, $P=3\text{mm}$, $I=0.2\text{mm}$ FIG_11



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 664680
FR 0504822

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	SABBAGH H A ET AL: "Verification of an eddy-current flaw inversion algorithm" IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. MAG-22, no. 6, novembre 1986 (1986-11), pages 1881-1886, XP002373022 ISSN: 0018-9464 * le document en entier * -----	1-12	G01N27/90
X	SABBAGH H A ET AL: "An eddy-current model for three-dimensional inversion" IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. MAG-22, no. 4, juillet 1986 (1986-07), pages 282-291, XP002373023 ISSN: 0018-9464	1,3,9, 10,12	
A	* le document en entier *	4-8	
X	WO 98/40732 A (JENTEK SENSORS) 17 septembre 1998 (1998-09-17)	1-3,9,12	
A	* page 11, ligne 16 - page 28, ligne 21; figures 1,6A-17A *	4,10,11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
A	US 6 675 106 B1 (KEENAN M R ET AL) 6 janvier 2004 (2004-01-06) * colonne 8, ligne 58 - colonne 16, ligne 28; figures 6,7 *	4-8	G01N

1	Date d'achèvement de la recherche	Examinateur	
EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)	20 mars 2006	Johnson, K	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul	Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		
A : arrière-plan technologique	O : divulgation non-écrite		
P : document intercalaire			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0504822 FA 664680**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **20-03-2006**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 9840732	A 17-09-1998	AU 6760898 A CA 2282650 A1 DE 69814601 D1 DE 69814601 T2 EP 0966676 A1	29-09-1998 17-09-1998 18-06-2003 01-04-2004 29-12-1999
US 6675106	B1 06-01-2004	AUCUN	