

Détection et localisation de défauts en échographie ultrasonore

Julien Sallard*, Luc Paradis* et Jean-Louis Lacoume**

* CEA-CEREM. Bât. 611 CEN Saclay 91191 Gif-sur-Yvette

E-mail: sallard@lcus15.saclay.cea.fr

** CEPHAG, INPG/IEG, 38402 Saint-Martin-d'Hères

RÉSUMÉ

L'interprétation des images ultrasonores est un problème délicat. La durée temporelle de l'onde émise par le transducteur, sa déformation au cours de sa propagation et la largeur du faisceau rendent difficile la détection et la localisation des défauts. Afin d'accroître la résolution des images ultrasonores, nous présentons un traitement en deux étapes. Chaque signal composant l'image est déconvolué séparément par rapport à un même signal. On augmente ainsi la résolution axiale et on met en forme les données pour le second traitement. L'image est ensuite reconstruite grâce à un algorithme de type SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) dont les lois de reconstruction sont calculées à partir d'une simulation numérique du champ rayonné.

1 Introduction

Le contrôle non destructif (CND) par ultrasons est une technique utilisée depuis de nombreuses années pour détecter et caractériser les défauts dans les structures. Schématiquement, un transducteur émet une onde ultrasonore (ondelette) qui se propage dans le matériau. Lorsque cette ondelette rencontre une inhomogénéité, une partie de l'énergie émise est rediffusée. Le transducteur fonctionne alors en réception et transforme le champ de pression réémis en un signal électrique (Ascan). On déplace le capteur suivant une droite pour effectuer de nouvelles mesures. Une représentation classique des données consiste à juxtaposer les signaux enregistrés pour former une image dite Bscan qui peut être vue comme une coupe du matériau contrôlé. Cette image ne permet pas de connaître précisément les caractéristiques physiques du matériau. En effet, l'écho produit par une variation locale de la réflectivité est altéré par la forme d'onde à l'émission et par la déformation de l'ondelette au cours de sa propagation. De plus, le faisceau ultrasonore ayant une certaine largeur, un défaut même ponctuel est détecté pour plusieurs positions consécutives du capteur. Il apparaît donc en plusieurs points de l'image.

L'estimation de la réflectivité du matériau à partir du signal observé n'est habituellement traité comme un problème de déconvolution monodimensionnelle. Le signal re-

ABSTRACT

The examination of ultrasonic images is a hard task. The length of the wavelet emitted by the transducer, its modification along its propagation and the width of the beam blur the detection and the localization of defects. To enhance the resolution of ultrasonic images we present a process in two steps. First, each signal of the image is deconvolved separately with respect to the same signal. It enhances the axial resolution and prepare the data for the second process. Then, the ultrasonic image is reconstructed with a modified version of the SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) algorithm. The reconstruction laws are calculated from a numerical simulation of the ultrasonic field.

çu est alors assimilé au filtrage linéaire de la réflectivité par l'ondelette émise. L'hypothèse implicite d'invariance de l'ondelette au cours de sa propagation n'est généralement pas respectée en CND. Lorsque ce phénomène est négligé les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants comme le souligne Bulo [1]. Une approche possible est de recourir à une réponse impulsionnelle variable [2], mais la prise en compte de la déformation de l'ondelette est délicate et requiert une bonne connaissance physique du problème. Cette approche monodimensionnelle est incomplète car elle n'apporte pas de réponse à la mauvaise résolution latérale de l'image Bscan.

Notre approche est fondée sur une modélisation physique du champ rayonné et de l'interaction faisceau-défaut. On peut ainsi modéliser le signal ultrasonore mesuré sous la forme d'un produit de convolution entre une fonction temporelle et une fonction dépendant non seulement du temps mais aussi de la position du défaut dans le champ du capteur. Le problème de la détection et de la localisation de petits défauts est résolu en traitant successivement le signal monodimensionnel Ascan puis l'image Bscan. Chaque Ascan est déconvolué séparément par rapport à un même signal de référence afin de s'affranchir de la forme d'onde temporelle émise par le capteur. On améliore ainsi la résolution axiale de l'image. On applique ensuite à l'image déconvoluée un traitement de type SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) qui améliore la résolution latérale. Ce traitement construit point par point une nouvelle image en

sommant les données suivant des lois de retard dépendant de la position considérée.

2 Modélisation du signal ultrasonore

Le transducteur, excité par une tension électrique, émet une onde ultrasonore. Dans un liquide, la pression $p(\mathbf{M},t)$, reçue en un point \mathbf{M} quelconque du champ au cours du temps t , s'exprime grâce à la notion de réponse impulsionnelle spatio-temporelle sous la forme:

$$p(\mathbf{M},t) = \rho_0 \cdot \frac{\partial v(t)}{\partial t} * h(\mathbf{M},t) \tag{1}$$

où $v(t)$ est la vitesse particulière à la surface du transducteur, ρ_0 la masse volumique du milieu de propagation et $*$ représente l'opérateur de convolution temporelle. La fonction $h(\mathbf{M},t)$ est appelée réponse impulsionnelle de diffraction du capteur. Elle traduit la déformation de l'onde au cours de sa propagation et s'exprime sous la forme:

$$h(\mathbf{M},t) = \int_{\Gamma_{rad}} \frac{\delta(t - \frac{r}{c})}{2\pi r} dS_0 \tag{2}$$

r est la distance entre le point \mathbf{M} et la surface du traducteur.

Le même traducteur est utilisé en réception. Dans l'hypothèse où le défaut insonifié se comporte comme un émetteur ponctuel (même ordre de grandeur que la longueur d'onde), alors la déformation subie par l'onde au cours du trajet retour est aussi, d'après le principe de réciprocité, $h(\mathbf{M},t)$. Le signal mesuré s'écrit alors:

$$s(x,t) = e_{ref}(t) * h(\mathbf{M},t) * h(\mathbf{M},t) = e_{ref}(t) * H(\mathbf{M},t) \tag{3}$$

où $e_{ref}(t)$ est l'écho de référence enregistré pour un réflecteur ponctuel placé au point focal, x est la position du traducteur.

Dans le cas de deux milieux de propagation différents (par exemple traducteur en immersion contrôlant un bloc d'acier), le principe de réciprocité reste applicable mais l'équation (3) comporte alors un terme supplémentaire (coefficient de réflexion à l'interface).

Le modèle présenté permet d'interpréter le signal échographique Ascan comme le résultat du filtrage linéaire de l'écho de référence par $H(\mathbf{M},t)$. Ce filtre spatialement variable est la réponse impulsionnelle en émission-réception du défaut. Il traduit la déformation de l'onde lors du trajet aller-retour entre l'émetteur et le défaut et l'interaction de l'ondulette avec ce défaut. Trois phénomènes perturbent l'observation: le spectre limité de l'ondulette de référence ($e_{ref}(t)$), sa déformation au cours de la propagation ($H(\mathbf{M},t)$) et la largeur du faisceau.

3 Déconvolution par rapport à l'écho de référence

On cherche, dans un premier temps, à s'affranchir du signal de référence pour restaurer la réponse impulsionnelle d'un défaut ponctuel. Au point focal la réponse impulsionnelle est un Dirac. Hors de la zone focale, elle tend à s'élargir. La fonction de transfert du défaut étant beaucoup plus large bande que le spectre du signal de référence il est nécessaire d'introduire de l'information a priori lors de la

déconvolution. Nous avons choisi une méthode bayésienne de déconvolution. Ce type de méthode est bien adapté au cas où une information a priori sur la fonction à restaurer est disponible. De plus, l'apport d'information a priori rend la déconvolution robuste au bruit. Dans le domaine de la géophysique, Mendel et son équipe ont représenté le milieu avec un modèle Bernoulli-Gaussien [3]:

$$\mu(k) = r(k) \cdot q(k) \tag{4}$$

où $r(k)$ est une variable gaussienne centrée commandant l'amplitude des réflecteurs, $q(k)$ est une variable de Bernoulli déterminant la présence ou non de réflecteurs. Grâce à la propriété d'invariance de l'estimateur du maximum de vraisemblance ce modèle permet de découpler le problème de la détection des événements de celui de l'estimation de leur amplitude. Le choix d'un modèle Bernoulli-Gaussien est approprié pour reconstruire une séquence peu dense de Diracs. L'algorithme particulier retenu pour la déconvolution des signaux Ascan a été développé par Goussard et al. [4]. Il a l'avantage d'utiliser une représentation MA de l'ondulette qui est une transcription directe de l'équation de convolution.

3.1 Application à des signaux simulés

Nous avons simulé le contrôle d'un défaut ponctuel immergé dans l'eau et situé à 40mm de la surface d'un traducteur dont la fréquence centrale est 2Mhz (longueur d'onde dans l'eau 0,74mm). Le traducteur est déplacé avec un pas de 1mm. La fréquence d'échantillonnage est de 20Mhz (l'abscisse des figures est graduée en nombre d'échantillons sauf indications contraires). Le rapport signal sur bruit (RSB: puissance moyenne du signal sur variance du bruit) varie de 4dB à 60dB suivant la position du capteur lors de la réception du signal.

La figure 1 présente l'écho de référence utilisé lors de la déconvolution ainsi que trois exemples de déconvolution. Les signaux correspondant ont été acquis lorsque le défaut était décalé par rapport à l'axe du traducteur de 0mm, 3mm et 7mm.

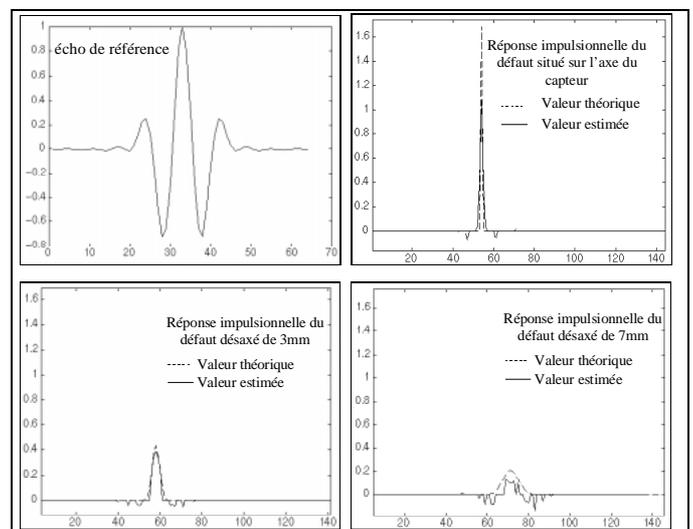


Figure 1

On constate que sur l'axe du traducteur la réponse impulsionnelle du défaut peut être assimilée à un Dirac. Plus on

s'éloigne de l'axe plus elle tend à s'atténuer et à s'élargir. Son estimation se dégrade au fur et à mesure que l'on s'écarte de l'axe. Ceci était prévisible dans la mesure où le RSB diminue et la réponse impulsionnelle diffère du modèle de Bernoulli. Près de l'axe, l'estimation est excellente. L'image Bscan avant et après déconvolution est présentée figure 2. Cette représentation correspond à une juxtaposition des signaux enregistrés lors du déplacement du transducteur. L'amplitude de chaque signal temporel est représentée en niveaux de gris.

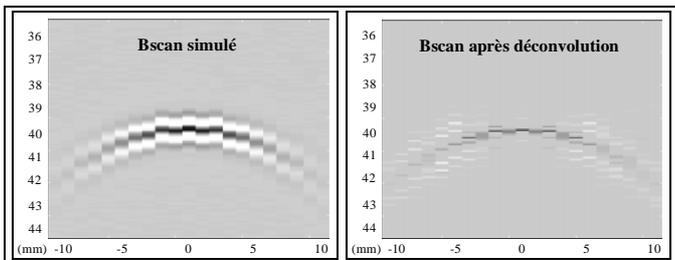


Figure 2 : image Bscan avant et après déconvolution

On constate clairement sur cette représentation qu'après déconvolution le défaut est mieux localisé en profondeur. La faible résolution latérale n'est évidemment pas améliorée. Il sera nécessaire de mettre en œuvre un second traitement.

3.2 Application à des signaux expérimentaux

Le transducteur utilisé pour le contrôle est incliné à $12,6^\circ$ pour créer, dans le matériau, des ondes longitudinales réfractées à 60° (figure 3). La fréquence centrale est de 2Mhz. Le matériau contrôlé est un bloc d'étalonnage en acier ferritique. Des trous 'génératrices' de 2mm de diamètre (0,68 longueur d'onde) sont percés parallèlement à la surface et perpendiculairement au déplacement du transducteur. Ils sont espacés en profondeur de 4mm.

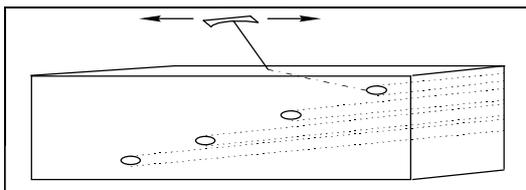


Figure 3 : schéma du contrôle

La figure 4 présente l'écho de référence utilisé pour la déconvolution. La figure 5 montre un exemple de signal Ascan avant et après déconvolution. Ce signal correspond à l'écho enregistré lorsque le trou est légèrement décalé par rapport à l'axe focal du transducteur.

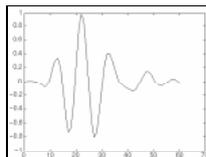


Figure 4 : écho de référence

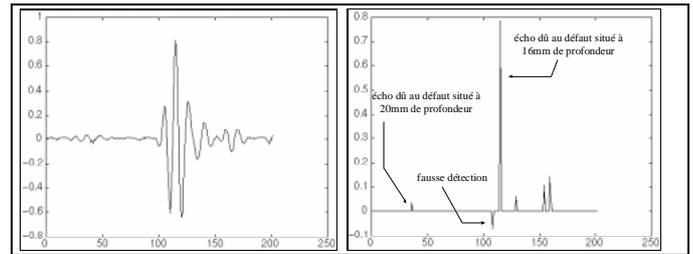


Figure 5 : signal Ascan avant et après déconvolution

L'écho principal provient du trou percé à 16mm de profondeur. Un premier écho d'amplitude beaucoup plus faible est dû à un trou situé à 20mm de profondeur. Les derniers échos proviennent sans doute de l'interférence des échos dus aux trous situés à 16mm et 12mm de profondeur. L'algorithme de déconvolution réalise une fausse détection située avant l'écho de plus forte amplitude. La figure 6 présente l'image Bscan avant et après déconvolution.

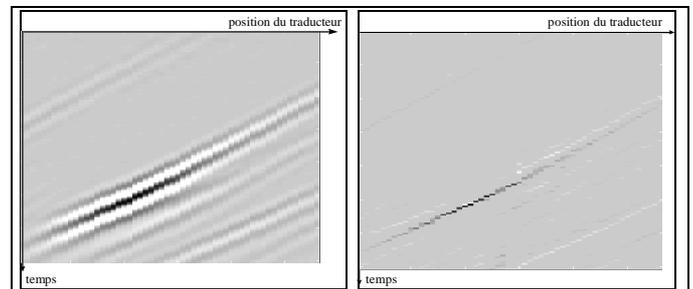


Figure 6 : image Bscan avant et après déconvolution

L'écho principal apparaît nettement et l'oscillation du signal a été supprimé grâce à la déconvolution. Les autres échos sont également détectés mais apparaissent moins nettement sur ce type de représentation.

4 Traitement de l'image Bscan

On utilise en échographie ultrasonore, le traitement numérique SAFT afin d'améliorer la résolution latérale des images Bscan. Au-delà du point focal (champ lointain) le champ acoustique émis par un transducteur focalisé diverge et varie lentement. L'image Bscan d'un défaut est donc composée d'un certain nombre de répliques décalées dans le temps d'un même écho. Le temps de vol mis par l'onde pour effectuer le trajet aller-retour entre le transducteur et le défaut est une fonction hyperbolique dépendant de la position du transducteur et de la profondeur du défaut. L'algorithme SAFT construit point par point une nouvelle image. Chaque point résulte de la sommation des points situés sur l'hyperbole correspondant à la position du point à reconstruire [5]. Si un défaut est effectivement présent à cette position la sommation est constructive, sinon la sommation est destructive et l'amplitude résultante est faible. Le traitement SAFT permet ainsi de réaliser quelle que soit la profondeur une focalisation numérique.

Suivant le transducteur utilisé ou la zone contrôlée (champ proche), le champ acoustique ne peut être approximé par une onde sphérique divergente. Le calcul des lois de retards basé uniquement sur la géométrie du système est alors erroné. Afin de déterminer ces lois nous proposons de réaliser une simulation numérique du champ rayonné [6]. On connaît ainsi pour toutes les positions du transducteur le champ

reçu en chaque point du matériau. En tout point, le calcul des lois de retard est basé sur le temps pour lequel le champ est maximum.

Pour un transducteur mal focalisé ou en champ proche, le champ est complexe et varie. Lors du déplacement du transducteur, les échos obtenus ne sont pas des répliques d'un même signal. La sommation est fréquemment destructive car le signal mesuré est de nature oscillante. Le traitement initial de déconvolution permet de restaurer la réponse impulsionnelle du défaut qui est proche d'une gaussienne. Après déconvolution, la sommation n'est donc plus destructive. De plus la déconvolution étant effectuée séparément pour chaque signal composant l'image, les erreurs de déconvolution ne sont pas corrélées avec celles des signaux voisins. Lors de la sommation les erreurs sont atténuées car le SAFT réalise par essence un moyennage.

La figure 7 est le résultat de la reconstruction SAFT de l'image Bscan simulée présentée précédemment (figure 2). Le pas latéral et axial de reconstruction de l'image est de 1mm. Le demi angle d'ouverture utilisé lors de la reconstruction varie en fonction de la profondeur et est égal à 14° à la profondeur du défaut. La résolution latérale de l'image est nettement accrue par le traitement. On observe une chute de l'amplitude de 12 dB à 1mm de la position du maximum. Ce dernier est obtenu à la position du réflecteur.

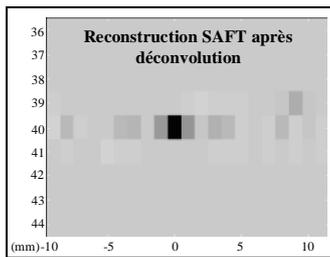


Figure 7 : image Bscan après traitements.

Une évaluation des performances du traitement a été réalisée sur la simulation du contrôle de deux défauts ponctuels situés à la même profondeur et décalés de 5mm. Cette distance est à comparer à la largeur à 12 dB du champ acoustique en émission-réception, mesurée à la profondeur du défaut et estimée à 10mm. Le transducteur reste inchangé par rapport à la simulation précédente. La figure 8 présente l'image Bscan simulée et le résultat de la reconstruction SAFT effectuée après déconvolution.

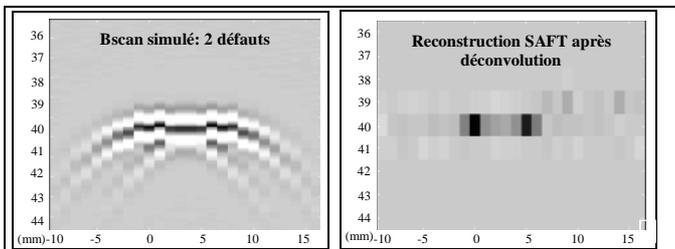


Figure 8 : image Bscan avant et après traitements.

Le traitement conduit à une séparation nette des deux défauts. L'accroissement de la résolution apparaît encore plus clairement sur la figure 9. Une chute de 13dB est observée entre les deux maxima d'amplitude correspondant à chacun des deux défauts. Cette valeur est à comparer à celle mesurée avant traitement qui est égale à 0,4 dB. Les maxima

d'amplitude sont obtenus à la position théorique des deux réflecteurs.

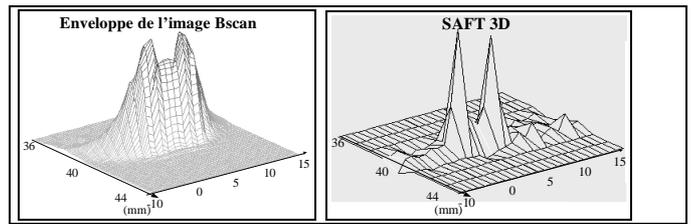


Figure 9 : représentation 3D.

Les performances de l'algorithme SAFT dépendent de la largeur du faisceau et de la forme des fronts d'onde. La méthode devra être validée sur des mesures expérimentales qui permettront de définir les limites et les performances exactes d'un tel traitement. Une extension de la méthode à des défauts de dimension finie devra également être entreprise.

5 Conclusions

Le signal échographique mesuré résulte du filtrage linéaire d'un signal de référence par un filtre de réponse impulsionnelle variable. L'interprétation des mesures est délicate car elles dépendent des caractéristiques du capteur et des positions relatives du capteur et des défauts.

Pour détecter et localiser des défauts ponctuels situés dans un matériau, nous proposons un traitement en deux étapes. Une déconvolution des signaux Ascan permet dans un premier temps de s'affranchir de la forme d'onde à l'émission améliorant ainsi la résolution axiale. Un traitement SAFT modifié permet ensuite d'obtenir une focalisation numérique quelle que soit la profondeur et une localisation précise des défauts.

6 Références

- [1] M. Bulo, S. Mottelet et P. Simard, "Comparaison d'algorithmes de déconvolution pour l'analyse et la classification des signaux d'échographie ultrasonore", Treizième colloque GRETSI, Sep. 1991, p. 89-92.
- [2] L. Vivet et G. Demoment., "Evaluation de quelques méthodes de déconvolution en contrôle non destructif", Douzième colloque GRETSI Juin 1989, p. 735-738.
- [3] J. J. Kormylo et J. M. Mendel, "Maximum likelihood detection and estimation of Bernoulli-Gaussian processes", IEEE Trans. on Info. Theory, Vol. 28, No. 3 (1982) p. 482-488.
- [4] Y. Goussard, G. Demoment et J. Idier, "A new algorithm for iterative deconvolution of sparse spike trains", Proc. Int. Conf. ASSP 90, Albuquerque, New Mexico 1990, p. 1547-1550.
- [5] K. J. Langenberg, M. Berger, Th. Kreutter, K. Mayer et V. Schmitz, "Synthetic aperture focusing technique signal processing", NDT International, Vol. 19, No. 3 (1986) p.177-189.
- [6] M. El Amrani, P. Calmon, O. Roy, D. Royer et O. Casula, "The ultrasonic field of focused transducers through a liquid-solid interface", Review of progress in QNDE, Vol. 14 (1995), p. 1075-1082.