

COMPARAISONS D'ALGORITHMES DE DECONVOLUTION
POUR L'ANALYSE ET LA CLASSIFICATION \$
DES SIGNAUX D'ECHOGRAPHIE ULTRASONORE

M.Bulo - S.Mottelet - P.Simard
URA CNRS n°817-Heudiasyc
Université de Technologie de Compiègne

RÉSUMÉ

L'échographie de matériaux par ultrasons souffre d'un problème de définition dû à l'étalement temporel de l'ondelette utilisée. Nous proposons de chercher à résoudre ce problème en déconvoluant le signal, c'est à dire en restituant la séquence de réflexion.

1. Introduction :

L'utilisation des ultrasons dans les techniques de contrôle non destructif est désormais bien connue: Une ondelette w émise par une céramique résonnante se propage au sein du matériau contrôlé et une partie de son énergie est renvoyée sous forme d'onde réfléchiée à chaque rupture d'impédance acoustique rencontrée.

L'ondelette utilisée peut être modélisée par un signal d'énergie finie à bande étroite.

On comprend facilement que cette ondelette constitue par elle même une limitation à la résolution de cette méthode de contrôle. En effet, deux réflecteurs consécutifs (ruptures d'impédance acoustique) très proches l'un de l'autre retourneront des échos qui se chevaucheront plus ou moins largement. Le problème est particulièrement critique s'il s'agit de détecter un petit défaut sous l'interface. La différence d'énergie des deux échos est telle que la présence du petit écho de défaut noyé dans la fin de l'écho d'interface risque de passer totalement inaperçu.

Nous proposons dans cet article de résoudre ce problème en estimant la séquence de réflectivité, c'est à dire la réponse impulsionnelle du matériau, à partir du signal mesuré. Il s'agit donc clairement d'effectuer la déconvolution des signaux du contrôle.

ABSTRACT

Testing materials by Ultrasonic NDT present a major problem in keep with the length of the acoustic wavelet that is used. We propose to solve this problem by inverting the signal and estimating the reflexivity series .

2. Modélisation

On considère habituellement que la réponse du matériau à une impulsion est une suite peu dense de pics correspondant à chacune des ruptures d'impédance acoustique (séquence de réflectivité) rencontrée sur la section contrôlée. Moyennant cette hypothèse, et en fonction de la célérité des ondes dans le matériau, il est licite de représenter cette séquence sous la forme :

$$h(t) = \sum_i a_i \cdot \delta(t-t_i) \quad \text{où } t_i \text{ correspond au temps}$$

mis par l'ondelette pour effectuer un aller retour entre l'interface et le réflecteur i . (Cette suite est nécessairement finie, ne serait ce qu'à cause de l'atténuation dans le matériau). Le signal mesuré et numérisé peut donc être modélisé de la façon suivante:

$$z_k = \sum_{j=0}^{M-1} w_j h_{k-j} + n_k$$

n est un bruit supposé blanc, en général assez faible.

3. Déconvolution :

Effectuer la déconvolution de ce signal revient à rechercher un filtre, linéaire ou non, qui, appliqué au signal z donne une estimation y_h de la séquence h . La recherche de ce filtre se fait à l'aide



d'information a priori, soit sur l'ondelette w , soit sur la structure de la séquence h . Plusieurs approches ont été développées, en particulier par les géophysiciens qui ont des problèmes semblables, quoiqu'à une échelle infiniment plus grande... Ces méthodes se classent en deux grandes catégories selon que l'ondelette est connue, ou que l'on se fixe seulement des conditions sur h ; (on parle alors de déconvolution myope).

Nous comparons ici les résultats obtenus avec trois techniques différentes: une première méthode minimisant une norme L_p , qui nécessite la connaissance préalable de l'ondelette, une méthode basée sur un critère d'entropie minimum, et la déconvolution de vraisemblance maximum.

3.1) Déconvolution par les normes L_p :

Sous cette appellation, on regroupe à l'heure actuelle seulement deux possibilités effectives : $p=1$ ou $p=2$. Les autres valeurs sont inutilisables. Le principe de ces méthodes consiste à trouver y_h tel que la fonction:

$$J_p = \|z - y_h * w\|_p + \lambda \|y_h\|_p$$

$$\lambda \geq 0$$

Le terme de pénalisation $\lambda \|y_h\|_p$ est nécessaire pour se prémunir contre les pics parasites. Il garanti la convexité du système.

Dans ce genre de problème, l'utilisation de $p=2$ semble toute indiquée, puisqu'elle conduit au problème classique d'estimation des moindres carrés. En fait, il est impossible d'obtenir une bonne estimation de la séquence de réflectivité à l'aide de cette méthode. De nombreux essais, tant simulés que réels ont montrés que le cas non pénalisé ($\lambda = 0$) conduit à la détection de très nombreux pics parasites, (fig 3.1a) tandis que les cas utilisant l'effet modérateur du terme de pénalité conduit à une séquence estimée composée de pics larges [1], ce qui nuit évidemment à la définition recherchée.

En fait les meilleurs résultats sont obtenus pour $p=1$. La minimisation d'une norme L_1 n'est pas aussi simple. Deux algorithmes ont toutefois été présenté dans la littérature: L'algorithme du simplexe est une solution idéale utilisée généralement pour minimiser des fonctions linéaires sous contraintes linéaires [1], mais qui a le défaut de demander beaucoup de mémoire. Une solution plus raisonnable a été proposée dans [2], l'algorithme Itératif des Moindres Carrés Repondérés. (IRLS). Les résultats sont satisfaisant, mais il converge très lentement (plusieurs dizaines d'itérations) et manipule des

matrices très grandes. Dans la même référence, les auteurs proposent un autre algorithme rapide, le Residual Steepest Descent (RSD) qui est à peu de chose près un algorithme de gradient. L'inconvénient des méthodes de gradients est qu'elles sont mal adaptées au problème qui nous concerne c'est à dire l'estimation d'un vecteur avec seulement quelques composantes non nulles. D'où l'idée de définir un algorithme semblable dont la direction de descente corresponde à la composante présentant la dérivée partielle la plus grande en valeur absolue.

Algorithme :

- i) initialisation : prendre $y^{(0)} =$ vecteur nul
- ii) calcul du résidu : $r^{(k)} = z - y^{(k)} * w$
et le gradient $g^{(k)} = \nabla_y J_1(y^{(k)}, \lambda)$
- iii) choisir la direction j_{opt} correspondant à la plus grande dérivée partielle
- iv) trouver $\rho > 0$ solution du problème :
 $\text{Min } J_1(y^{(k)} + \rho d^{(k)}, \lambda)$ avec $d^{(k)}_j = -g_j^{(k)} \delta_{j, j_{opt}}$
- v) mettre à jour
$$y_{j_{opt}}^{(k+1)} = y_{j_{opt}}^{(k)} - \rho \cdot g_{j_{opt}}^{(k)}$$
- vi) test d'arrêt.

Cet algorithme conduit à des solutions très proches de celles fournies par l'IRLS au problème pénalisé. Mais il est bien plus rapide. Il conduit en outre à une recherche séquentielle des pics par ordre d'importance. Les résultats présentés au §4 ont été obtenus avec cet algorithme.

3.2. Déconvolution d'entropie minimale :

Développée par Wiggins [4], la déconvolution d'entropie minimale repose sur l'optimisation d'un certain critère supposé caractériser la structure de la séquence recherchée. Cette séquence étant en principe une suite peu dense d'événements, le critère devra varier en fonction de la complexité de la réponse estimée.

La méthode MED consiste à rechercher un filtre linéaire qui estime la séquence de réflectivité à partir du signal observé et dont les coefficients sont obtenus en dérivant le critère choisi. Cette méthode ne fait appel à aucune connaissance sur l'ondelette, c'est une méthode myope.

Cette méthode fournit en simulation des résultats intéressants sur des signaux non bruités, mais se révèle très sensible au bruit. Les résultats sur signaux réels sont très mauvais.

Il convient de noter qu'en CND, il est assez facile d'obtenir une estimation de l'ondelette, soit par mesure sur une surface de référence, soit en segmentant un écho isolé. Il n'y a donc pas une nécessité absolue d'utiliser des méthode myope.

3.3 Déconvolution de vraisemblance maximum :

Cette technique développée par Mendel utilise une procédure de détection-estimation basée sur une représentation d'état du système [6]. Il s'agit là encore d'une méthode myope, mais celle ci fournit en simulation des résultats beaucoup plus probants que MED. Ceci tient sans doute au fait que le bruit est inclus dans le modèle utilisé par Mendel. L'algorithme que nous avons utilisé est décrit dans la référence [7] et les résultats en simulation sont encourageants.

4. Les signaux d'essais :

Outre les simulations numériques, nous avons testé ces algorithmes sur des signaux réels. Il s'agit d'échographie d'un bloc d'acier (Z2CN 18-10) dans lequel on a percé des trous parallèlement à la surface contrôlée. Ces trous d'un diamètre de $0.5 \pm 0.05\text{mm}$, sont percés à des distances de 5.25 à 1.75mm de la surface (fig4). Les enregistrements ont été effectués sur 8 bits à 100MHz et il a été nécessaire de saturer l'écho d'interface pour que la quantification laisse apparaître les échos de défauts. Cet aspect des choses est peu agréable, mais assez courant pour des raisons liées au coût du matériel. La première série de figures (4.1a et b) présente un signal enregistré sur une zone saine (a), une ondelette de référence (b) et le résultat de la déconvolution de norme L_1 (c). Malgré la saturation, un seul pic est observé. (On en observe parfois un second, rapproché et toujours positif, phénomène que l'on retrouve aussi quelquefois sur la déconvolution de signaux non sains).

La seconde série de figures (4.2) correspond à un signal enregistré à la verticale d'un défaut situé à 1.75mm de la surface (a) et à sa déconvolution de norme L_1 (b). On observe l'apparition d'un pic négatif dans la zone où le défaut est attendu : La précision sur la position d'un événement n'est pas très grande. Les sources d'erreur proviennent des variations sur la célérité des ondes et de la tolérance sur l'usinage des pièces. Ceci conduit à une incertitude de 2 à 4 points.

Sur les figures suivantes (4.3), nous montrons la déconvolution d'un signal enregistré au droit d'un défaut situé à 3.75mm de la surface. L'écho recherché est visible à l'oeil nu. Pourtant l'algorithme ne converge pas vers cet événement. Nous avons pu vérifier que la déconvolution de norme L_1 est extrêmement sensible à l'ondelette utilisée. Or en échographie, l'ondelette évolue au cours de sa propagation par atténuation de certaines composantes fréquentielles. Dans cet exemple, l'écho recherché a une forme trop éloignée de l'ondelette de référence utilisée, et l'algorithme ne le trouve pas. Si on isole cet écho pour servir

d'ondelette de déconvolution, on détecte alors cet événement seulement. On trouve sans doute ici la limite de la méthode.

5. Conclusion

L'étude présentée ici ne couvre qu'un aspect du problème, la détection sous l'interface. En outre, aucun des algorithmes testés ne semblent vraiment satisfaisant. La difficulté principale rencontrée vient du fait que l'ondelette évolue au cours de sa propagation, et que cet aspect n'est pas facile à prendre en compte dans la modélisation (système non invariant dans le temps).

La déconvolution de norme L_1 comporte quelques avantages et fournit en particulier une réponse proche de celle désirée. Toutefois, elle n'est pas très robuste vis à vis de l'ondelette utilisée. L'algorithme de variance minimum ne convient pas dans son état actuel et d'une façon générale, les algorithmes myopes placent la difficulté trop haut. Face à cette étude, il semble que la solution se situe du côté des algorithmes adaptatifs, mais en sachant que les évolutions de l'ondelette dépendent fortement du type de défaut rencontré.

Cette étude a été réalisée grâce au concours du laboratoire d'acoustique de l'université de Compiègne.

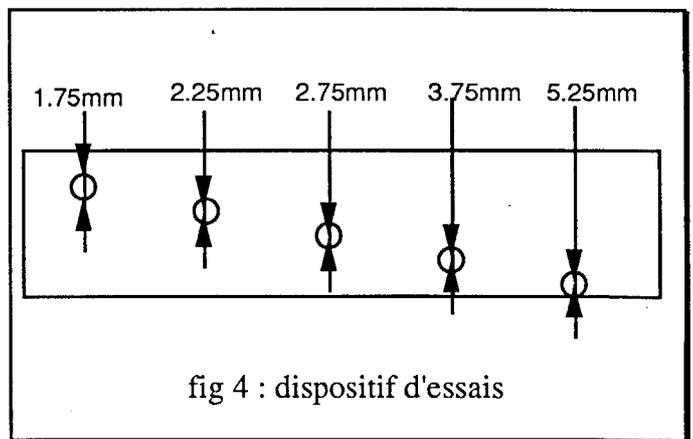


fig 4 : dispositif d'essais

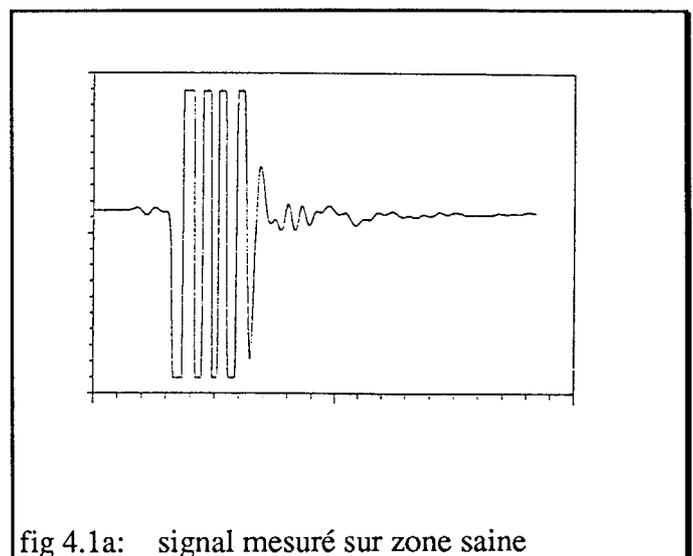


fig 4.1a: signal mesuré sur zone saine

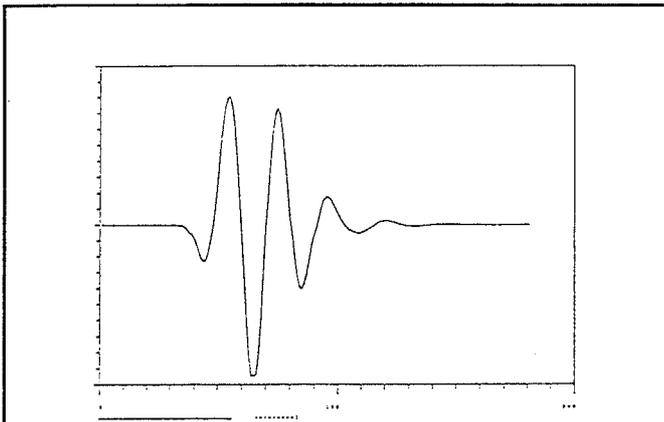


fig 4.2b: ondelette de référence

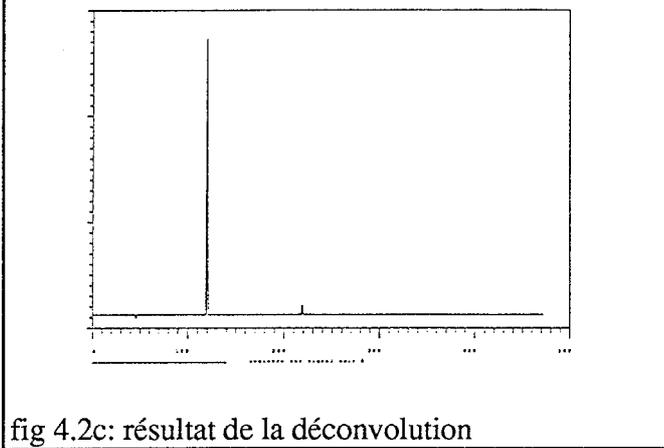


fig 4.2c: résultat de la déconvolution

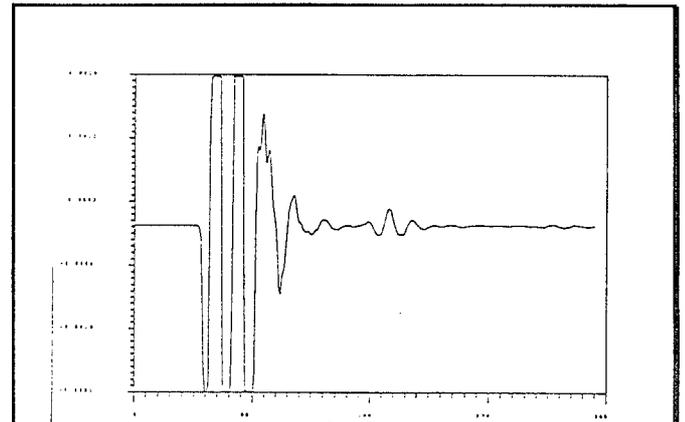


fig 4.3 : signal (défaut à 3.75mm)

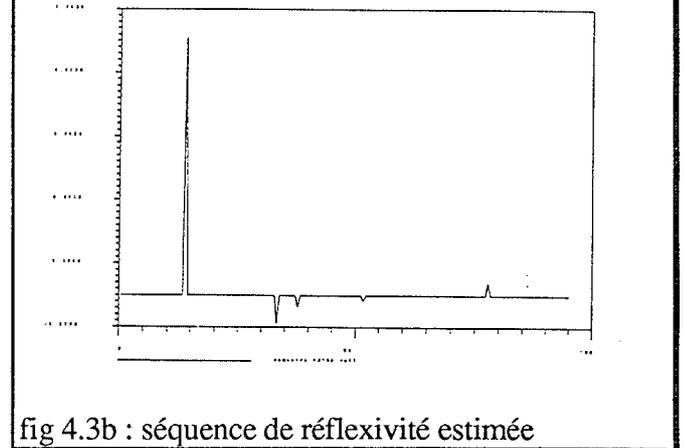


fig 4.3b : séquence de réflexivité estimée

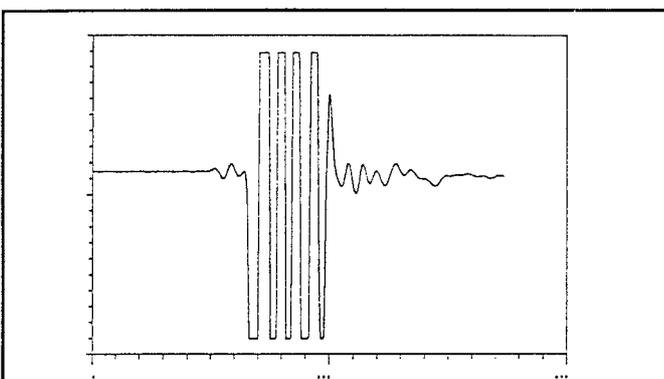


fig 4.3a signal (défaut à 1.75mm)

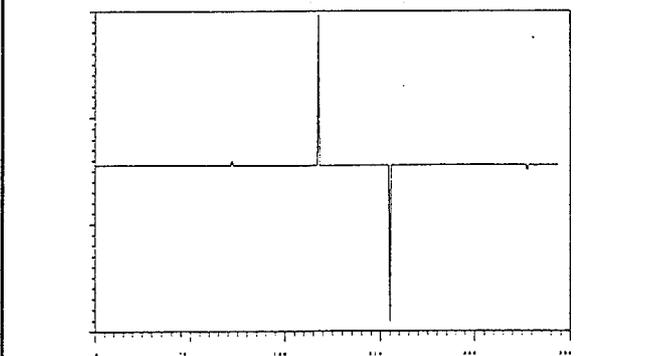


fig 4.2b : déconvolution de norme L1

Bibliographie

- [1] H.L.Taylor, S.C.Banks, et J.F.McCoy
"Deconvolution with the L_1 norm"
Geophysics, vol 44, n°1 pp39-52, jan.1979
- [2] R.Yarlagadda, J.B.Bednar et T.L.Watt
"Fast algorithms for L_p deconvolution"
IEEE trans. on ASSP, vol33, n°1, pp174-182, feb.1985
- [3] T.T.Pham et J.R.De Figueiredo
"Maximum likelihood estimation of a class of non gaussian densities with application to L_p deconvolution"
IEEE trans.on ASSP, vol37, n°1, pp73-82, jan.89
- [4] R.A.Wiggins,
"Minimum entropy deconvolution"
Proc.Int.Symp.Computer Aided Seismic Analysis and Discrimination, pp7-14, IEEE computer society, Falmouth, Mass.1977
- [5] M.Ooe et T.J.Ulrych
"Minimum entropy deconvolution with an exponential transformation"
Geophysical Prospecting, n°27, pp458-473, 1979
- [6] J.M.Mendel
"Optimal seismic deconvolution. An estimation based approach" Academic Press 1983.
- [7] M.Bulo et P.Simard
"Utilisation des moments d'ordre supérieur pour la déconvolution de vraisemblance maximum"
proc.Treizième Colloque Gretsi 1991,