

**EVALUATION DE QUELQUES METHODES DE  
DECONVOLUTION  
EN CONTROLE NON DESTRUCTIF**

Laurent VIVET <sup>(1,2)</sup> et Guy DEMOMENT <sup>(2)</sup>

(1) C.E.N. Cadarache, bat 315, 13115 Saint Paul-lez-Durance, France  
(2) L2S (C.N.R.S./E.S.E./U.P.S.), Plateau du Moulon, 91192 Gif-sur-Yvette Cédex, France

### RÉSUMÉ

Les traitements du type déconvolution monodimensionnelle se heurtent à un certain nombre de problèmes en contrôle non destructif lorsque le milieu étudié a une structure particulièrement anisotrope et inhomogène. Ceci est le cas de l'acier austénitique et nous exposons les difficultés liées à l'utilisation des ultrasons dans ce milieu et les contraintes de contrôle qui en résultent. Nous montrons que le problème important du filtrage de l'ondelette émise par le transducteur par le milieu de propagation ne peut être correctement résolu que dans le domaine temporel. Nous présentons trois méthodes de déconvolution temporelles, illustrées par des résultats obtenus sur signaux synthétiques et réels, ce qui permet de préciser leurs limites et domaines d'application.

### SUMMARY

One-dimensional deconvolution methods come up against problems in nondestructive testing when the investigated medium is highly anisotropic and inhomogeneous. This is the case of austenitic steel and we explain the difficulties encountered relative to the use of ultrasonic waves and the resulting inspection constraints. We show that the time-domain approach is the best way to solve the filtering effect of the medium on the wavelet emitted by the transducer. We introduce three time-domain methods with simulated and real results, in order to define their limits and application fields.

## 1. INTRODUCTION

Les spécificités des techniques d'échographie ultrasonore les rendent irremplaçables dans de nombreux problèmes de Contrôle Non Destructif (CND). Cependant, l'importante énergie acoustique qu'il faut émettre pour traverser de grandes épaisseurs ou des matériaux très atténuants impose l'utilisation de transducteurs résonnants, ce qui est incompatible avec un bon pouvoir séparateur. En effet les discontinuités d'impédance dans le milieu (e.g. un défaut) qui devraient idéalement se traduire par des pics sur l'échogramme reçu, tendent à s'élargir et à se recouvrir à cause du spectre d'émission limité du transducteur. Ce problème peut être résolu par un traitement de déconvolution. Mais les caractéristiques des milieux étudiés sont très défavorables à l'utilisation de telles méthodes et il est nécessaire de bien préciser leurs limites pour l'utilisateur potentiel. Des études critiques ont été récemment publiées à ce sujet [1]. L'objet de cette communication est d'apporter quelques éléments d'appréciation supplémentaires.

## 2. LE MILIEU AUSTENITIQUE

L'acier austénitique est un acier inoxydable très utilisé dans l'industrie nucléaire, car il est particulièrement résistant aux températures que l'on y rencontre. Ces aciers ont malheureusement une structure à gros grains (dendrites) orientée et inhomogène, ce qui se traduit par une très forte atténuation

en fréquence, et selon la direction, des ondes ultrasonores qu'on y fait se propager. Des études théoriques mettent en évidence l'accroissement de ces problèmes à l'approche (Zone Affectée Thermiquement, ZAT) et à l'intérieur (Zone Fondue, ZF) des régions soudées, qui s'accompagne de l'apparition d'un fort bruit de structure sur l'échogramme [2]. On est donc conduit en pratique à adopter l'incidence la moins pénalisante et une fréquence d'investigation réduite à quelques MHz, pour obtenir le meilleur compromis atténuation-résolution. Pour des soudures en acier austénitique d'épaisseur inférieure au centimètre, ce compromis est atteint avec un transducteur focalisé résonnant à cinq MHz. Dans ces conditions, un traitement ultérieur est nécessaire pour améliorer la résolution puisque celle-ci n'est alors que de l'ordre du millimètre.

## 3. BUT ET PRINCIPE DE L'ETUDE

On considère souvent la restauration de la réflectivité du milieu à partir du signal reçu comme un problème de déconvolution monodimensionnelle. Mais cette approche nécessite implicitement des hypothèses strictes de stationnarité et d'invariance de la réponse impulsionnelle, c'est à dire de l'ondelette émise par le transducteur. Or, l'utilisateur doit être conscient qu'en CND ces hypothèses se révèlent souvent très grossières. Nous apportons donc notre contribution en proposant une autre approche du problème de déconvolution. Nous le faisons en évaluant tout d'abord deux méthodes



existantes et provenant d'autres domaines d'application (génie biomédical et géophysique), puis en proposant une nouvelle méthode conçue à partir des caractéristiques du CND. L'analyse de ces caractéristiques nous a permis de modéliser synthétiquement le problème, ce qui permet d'effectuer clairement des comparaisons entre les méthodes et de valider correctement leurs comportements par rapport aux hypothèses. Les signaux réels, beaucoup plus complexes, relativisent les résultats obtenus et ne permettent pas de les analyser correctement.

#### 4. ANALYSE DU PROBLEME ET SYNTHÈSE DE SIGNAUX TESTS

##### 4.1. Hypothèses physiques

- Les transducteurs utilisés en CND sont à base de céramique frittée et délivrent typiquement une ondelette à phase non minimale (présence d'au moins un zéro en dehors du cercle unité). Cette caractéristique est supposée figée lors de la traversée du milieu.

- La structure de grains de l'acier austénitique atténue considérablement les ondes élastiques en fonction de leur fréquence, ce qui modifie le contenu spectral de l'ondelette et rend l'échogramme non stationnaire. Le profil de cette atténuation dans le milieu ne peut être déterminé car il est fonction de la direction de propagation, de la taille et de l'inhomogénéité des grains.

- Il y a peu de distortion de phase dans le milieu [2].

##### 4.2. Synthèse des signaux tests

Pour prendre en compte les hypothèses physiques exposées au §4.1, nous synthétisons le problème de la façon suivante :

- Nous mesurons une ondelette à phase non minimale réelle sur un écho de surface (Fig. 2b). Nous la dénommons ondelette "initiale" car elle n'a pas encore été modifiée par le matériau.

- Nous filtrons l'ondelette initiale (afin de rendre compte de la dégradation spectrale subie dans le milieu) sans modifier sa phase (qui est supposée constante lors de la propagation). Pour ce faire, nous réduisons exponentiellement le module de son spectre en fonction de la fréquence. L'ondelette résultante est dénommée ondelette "locale" car elle rend compte du contexte spectral à l'endroit de la séquence de réflectivité (Fig. 2c).

- Nous générons une séquence de réflectivité synthétique comportant un bruit de structure de forte amplitude (comme c'est le cas en milieu soudé) et six événements (Fig. 2a).

- Nous obtenons l'échogramme par convolution de la séquence de réflectivité idéale (représentant le milieu examiné) par l'ondelette locale (qui rend compte des limites spectrales du transducteur et de l'atténuation en fréquence du milieu). Un bruit blanc est ajouté (Rapport Signal/Bruit = 20 dB) pour représenter les erreurs de mesures (Fig. 2d).

Le problème est alors de retrouver la réflectivité idéale en connaissant uniquement l'échogramme et l'ondelette initiale.

#### 5. ECHEC DE L'APPROCHE FREQUENTIELLE

La déconvolution est fréquemment effectuée en CND dans le domaine fréquentiel en appliquant un filtrage inverse aux données observées. Ce filtre inverse est obtenu à partir de la réponse impulsionnelle du transducteur, c'est à dire de l'ondelette initiale. Cette approche donne des résultats rapidement aberrants puisqu'elle fait l'hypothèse implicite d'une ondelette invariante (Fig. 2e) . Le domaine temporel semble mieux adapté pour prendre en compte la modification de l'ondelette.

#### 6. MODELISATION MA DE L'ONDELETTE

Cette méthode est la transcription directe de l'équation de convolution discrète. L'ondelette locale est supposée connue et égale, comme au §5, à l'ondelette initiale mesurée.

$$y(n) = \sum_i h(i)x(n-i+1) + b(n) = \underline{h}^t \underline{x}(n) + b(n)$$

où  $y(n)$ ,  $n=1, 2, \dots, N$  représentent l'échogramme,  $\underline{x}(n)$  la séquence de réflectivité cherchée,  $\underline{h}$  l'ondelette locale, et  $b(n)$  le bruit de mesure.

Nous considérons que  $\underline{x}$  et  $\underline{b}$  sont des processus aléatoires gaussiens ; la déconvolution peut alors être traitée comme un problème d'estimation, que l'on résoud par l'utilisation du filtre de Kalman suivant :

$$\hat{\underline{x}}_{i+1} = \hat{\underline{x}}_i + \underline{k}_i(r_i)^{-1} (y_i - \hat{\underline{h}}_i^t \hat{\underline{x}}_i)$$

Pour réduire le coût en calcul, la réactualisation du terme stochastique  $\underline{k}_i(r_i)^{-1}$  est effectuée par les équations de Chandrasekhar, qui restent valables tant que le signal est stationnaire. On trouvera une description détaillée de l'algorithme dans [3].

Lorsque l'ondelette initiale ne se modifie pas trop dans le milieu ou lorsque l'on a la possibilité physique de la mesurer dans des conditions spectrales analogues à celles que l'on va rencontrer, cette méthode convient assez bien. On arrive alors à séparer des interfaces distantes de moins d'un dixième de millimètre. Mais l'approximation de l'ondelette locale par l'ondelette initiale se révèle inadaptée lorsque le milieu introduit une dégradation importante comme c'est le cas sur notre exemple synthétique (Fig. 2f) . La méthode à employer doit être plus adaptative.

#### 7. METHODE PREDICTIVE ADAPTATIVE

Pour prendre en compte la modification de l'ondelette dans le milieu, nous supposons que le signal mesuré est la réalisation d'un processus autorégressif.

$$y(n) = \underline{a}(n)^t \underline{y}_p(n) + \varepsilon(n)$$

où  $\underline{y}$  est le vecteur des observations,  $\underline{a}$  un vecteur de  $p$  paramètres autorégressifs qui décrivent l'ondelette locale, et  $\varepsilon(n)$  est la réflectivité recherchée, supposée blanche. L'ordre réduit et la nature d'estimée du vecteur  $\underline{a}$  confèrent une grande adaptativité à cette méthode largement utilisée en géophysique. Dans notre approche, les coefficients autorégressifs sont probabilisés et *a priori* non corrélés. L'information *a priori* porte alors sur les moyennes (supposées égales à 0) et les variances des vecteurs décrivant l'ondelette et la réflectivité (considérées gaussiennes).

La connaissance statistique de  $\underline{a}$  et de  $\varepsilon$  se résume donc à la connaissance du rapport de leur variance  $\mu = \sigma_\varepsilon^2 / \sigma_a^2$  qui est un hyperparamètre du problème. La valeur de cet hyperparamètre ne nous est pas connue puisqu'il donne en fait une mesure de la vitesse de modification de l'ondelette dans le milieu. Néanmoins on peut le déterminer à partir des mesures  $\underline{y}$  en définissant une fonction de vraisemblance marginale.

$$\mathcal{J}(\mu/\underline{y}) = \int p(\underline{y}/\underline{a}, \mu) p(\underline{a}/\mu) d\underline{a}$$

Cette vraisemblance est calculée en cours d'estimation. On effectue alors l'estimation pour plusieurs valeurs de  $\mu$ , afin de déterminer la valeur optimale de l'information *a priori* vis à vis

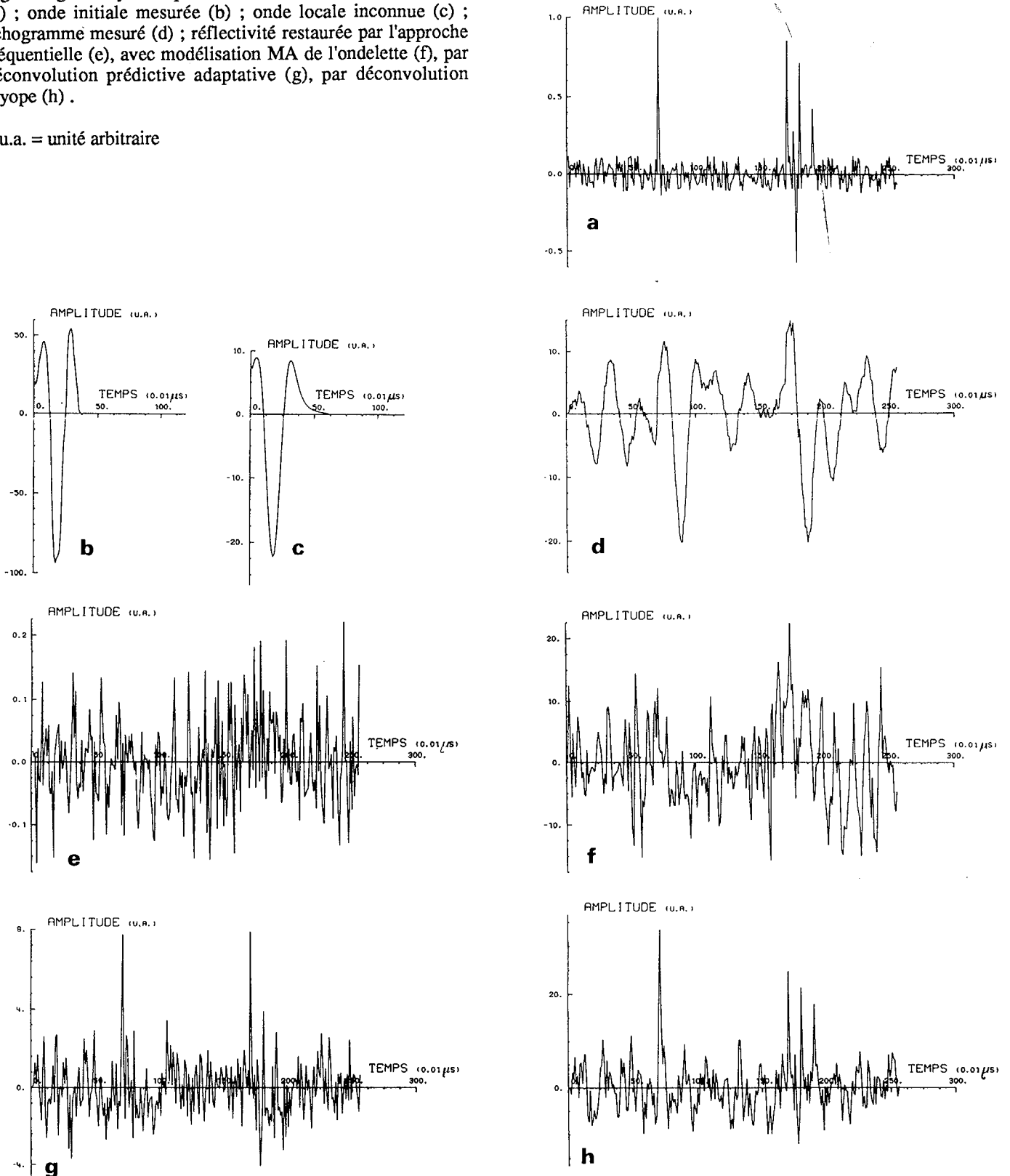
des observations. Ce procédé donne de bons résultats et l'ondelette estimée s'adapte au contexte spectral du milieu même dans les cas les plus difficiles. Mais cette méthode, qui fait l'hypothèse d'une description purement autorégressive de l'ondelette ne convient généralement pas en CND où les transducteurs délivrent le plus souvent des ondelettes à phase non minimale. Dans ce cas le résultat se dégrade à cause de la phase de l'ondelette (Fig. 2g).

### 8. METHODE MYOPE

Une méthode de déconvolution adaptée au CND doit être suffisamment adaptative tout en prenant en compte le caractère non minimal de la phase de l'ondelette. De telles méthodes existent dans d'autres domaines, mais font l'hypothèse d'une réflectivité Bernoulli-gaussienne [4] ou nécessitent une connaissance assez fine de la loi de probabilité de celle-ci [5].

Fig. 2. Signaux synthétiques : réflectivité inconnue à restaurer (a) ; onde initiale mesurée (b) ; onde locale inconnue (c) ; échogramme mesuré (d) ; réflectivité restaurée par l'approche fréquentielle (e), avec modélisation MA de l'ondelette (f), par déconvolution prédictive adaptative (g), par déconvolution myope (h).

\* u.a. = unité arbitraire





Nous décidons de conserver une modélisation gaussienne de la réflectivité (pour rendre compte du bruit de structure) et d'effectuer une déconvolution en deux étapes :

- Nous déterminons la Densité Spectrale de Puissance (DSP) du signal après traversée de la totalité du matériau. Nous synthétisons une ondelette dont le module correspond à cette DSP et dont la phase est celle de l'ondelette initiale. Nous en établissons la représentation temporelle et l'utilisons pour effectuer une déconvolution MA de l'échogramme (conf. §6). Cette étape est donc surtout une étape de correction de phase puisque le support spectral de l'ondelette synthétisée est plus étroit que celui de l'échogramme et ne permet donc pas de restaurer la réflectivité idéale.

- Nous postulons que la réflectivité estimée au cours de la première étape est la réalisation d'un processus autorégressif pur puisqu'elle prend en compte la phase de l'ondelette. Une déconvolution prédictive adaptative permet alors de restaurer le spectre de la réflectivité idéale (conf. §7).

Pour les essais de simulation, l'ondelette est synthétisée à partir de la DSP de l'ondelette initiale que l'on a considérablement filtrée pour simuler la traversée de la totalité du matériau. La méthode résoud bien les problèmes de non stationnarité et de phase non minimale (Fig. 2h) . En Zone Affectée Thermiquement, la présence d'une fissure électro-érodée doit se traduire idéalement par un pic négatif. La méthode myope restaure celui-ci parmi un important bruit environnant. Les autres méthodes aboutissent, soit à un résultat aberrant à cause de la connaissance imparfaite de l'ondelette locale (Fig. 3b) , soit à la restauration de deux événements, ce qui est en contradiction avec la réflectivité réelle et symptomatique d'une mauvaise connaissance de la phase de l'ondelette (Fig. 3c) .

Des essais en Zone Fondue n'ont pas permis de dégager des résultats aussi nets.

## 9. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons comparé trois méthodes de déconvolution temporelles sur des signaux synthétiques et réels caractéristiques du CND. La diversité des approches permet de relier chacune d'elles à la résolution d'un type de problème concret. L'esprit dans lequel est conçue notre méthode de déconvolution myope nous semble correspondre à la démarche à employer pour déconvoluer en CND. Les résultats déjà obtenus le confirment.

Les limites de la méthode en Zone Fondue viennent probablement de l'approximation des hypothèses avancées au §4.1. sur la phase de l'ondelette. Une étude de la modification des zéros de celle-ci au cours de la propagation dans le milieu doit permettre d'optimiser la détermination de l'ondelette utilisée lors de la correction de phase.

## 10. REFERENCES

- [1] Chen, C.H., Wei-Lien Hsu, Sam-Kit Sin, "A comparison of wavelet deconvolution techniques for ultrasonic NDT", Proc. ICASSP88, New York, 11-14 April 1988, vol. 2, pp. 867-70.
- [2] Ogilvy, J.A., "Ultrasonic reflection properties of planar defects within austenitic welds", Ultrasonics, Vol. 26, Nov. 1988, pp. 318-327.
- [3] Demoment, G., Reynaud, R. and Herment, A., "Range resolution improvement by a fast deconvolution method", Ultrasonic imaging, vol. 6 (1984), pp. 435-451.
- [4] Mendel, J.M., "Optimal seismic deconvolution, an estimation-based approach", Academic Press (1983).
- [5] Benveniste, A., Goursat, M. and Ruget, G., "Robust identification of a nonminimum phase system : blind adjustment of a linear equalizer in data communications", Transactions on automatic control, vol. AC-25, No 3, June 1980.

Fig. 3. Déconvolution en Zone Affectée Thermiquement : échogramme (a) ; réflectivité restaurée avec modélisation MA de l'ondelette (b), par déconvolution prédictive adaptative (c), par déconvolution myope (d) .

\* u.a. = unité arbitraire

