

Filtrage des échos ultrasonores en CND par la fonction de Cross Validation Généralisée (GCV)

F. TAFININE¹, B. OUAZINE¹ et A. HOUACINE²

¹Département d'Electronique, Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur, Laboratoire (LTII), Université A/Mira Bejaia, Algérie.

²Département de télécommunication, Faculté d'Electronique et d'Informatique, Laboratoire (LTS), USTHB Alger, Algérie.

ftafinine@hotmail.com, boualemh2000@yahoo.fr, a_houacine@lvcos.com

Résumé – Le Contrôle Non Destructif (CND) a pour objectif de répondre à plusieurs problèmes posés dans l'industrie à savoir : *i*) le problème de sensibilité liées à la détection de petits défauts noyés dans le bruit, *ii*) le problème de caractérisation qui concerne la classification des défauts détectés, *iii*) enfin le problème de résolution dans la séparation de défauts très rapprochés. Dans ce contexte, la détection des petits défauts noyés dans du bruit est le but principal des plus grands laboratoires de recherche en matière de CND. Dans ce travail nous introduisons l'opération de filtrage de bruit d'échos ultrasonores réels, provenant de pièces de différentes matières, dans le domaine temps-échelle. Le filtrage par seuillage est l'une des applications majeures de la transformée en Ondelettes (*T.O*) dans le domaine du traitement du signal. Les méthodes sous-jacentes remplacent les coefficients au-dessous d'un certain seuil par zéro et gardent ou rétrécissent le reste. Pour le choix du seuil, plusieurs méthodes existent. Nous présenterons ici, une méthode qui suppose le modèle de bruit blanc gaussien additif, cherchant un seuil qui minimise la fonction de cross validation généralisée (*GCV*), cette méthode présente l'avantage de ne pas avoir besoin de connaissance a priori sur la puissance du bruit qui affecte l'écho ultrasonore.

Abstract – The aim of Non Destructive Testing (NDT) is to overcome several problems arising in industry as: *i*) problem of sensitivity, especially when detecting the small defects drowned in noise, *ii*) characterization problem of detected defects, *iii*) the last, is the problem of separation resolution of closer defects. Nowadays, detection of small defects drowned in noise is the subject of several research activities in many NDT laboratories. Our work deals with this problem. It is based on a time-scale space denoising of real ultrasonic echoes coming from pieces parts with different kinds of materials. The denoising by thresholding in wavelet domain is adopted. The principle of this method is to replace the wavelet coefficients below a certain threshold by zeros and keep or shrink the remainder. Several methods, based on the assumption of additive white Gaussian noise, are proposed. All of them seek for the threshold which minimizes a certain criterion. That using the Generalized Cross Validation function (*GCV*). The advantage of this method comes from the fact that it doesn't need prior information about power of noise affecting the ultrasonic echo.

1. Introduction

Le souci de tout chef d'entreprise est de pouvoir contrôler périodiquement son installation industrielle en service et d'éviter tout risque d'accident économiquement ruinant. L'un des moyens les plus utilisés est le Contrôle Non Destructif, qui permet le contrôle des matériaux ou des structures afin d'en vérifier l'état et détecter les défauts sans les endommager. Après détection, on peut être amené à les identifier pour en déduire le degré de nocivité.

De nombreux domaines ont recours à ce type de contrôle, parmi lesquels on peut citer : l'industrie des canalisations et du stockage dans les secteurs du pétrole et du gaz, le nucléaire, l'automobile, l'aéronautique, l'aérospatial, etc.

Les ultrasons correspondent à des vibrations mécaniques de même nature que le son, mais de fréquence élevée (20 KHz à plusieurs centaines de Mhz). Ils peuvent se propager dans les gaz, les liquides et les solides, c'est-à-dire, dans toute substance possédant des propriétés élastiques. Les ondes ultrasonores ont des propriétés intéressantes : amortissement dans les métaux généralement faible, longueur d'onde de l'ordre de grandeur des hétérogénéités à découvrir et les discontinuités brusques sur leur trajet ne sont pas

contournées, ce qui renvoie l'onde partiellement vers la source [1].

Toutefois l'exploitation des techniques de traitement du signal offre un moyen de mettre en évidence les informations données par les échos ultrasonores afin de détecter des irrégularités (défauts) et par la suite effectuer une caractérisation [2], [3]. Cependant, l'amélioration de la qualité du contrôle par les techniques de traitement du signal, n'est pas un concept nouveau. Plusieurs techniques ont été déjà utilisées telles que : l'autocorrélation, l'analyse spectrale, l'analyse paramétrique, etc. Dans ces méthodes le signal est analysé soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel. Or, plusieurs études ont montré que l'utilisation de l'analyse temps-échelle est la plus appropriée, à cause de la non-stationnarité des signaux mis en jeux [4].

2. Description

L'écho ultrasonore est de nature *non-stationnaire*, ceci est dû au milieu de propagation non uniforme qui contient des discontinuités provoquant la variation de la fréquence de l'onde reçue par rapport à l'onde émise [5], [6].

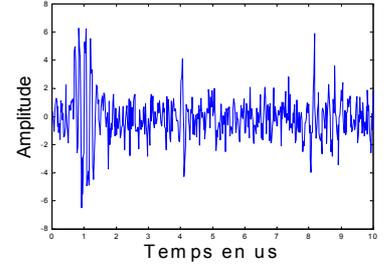
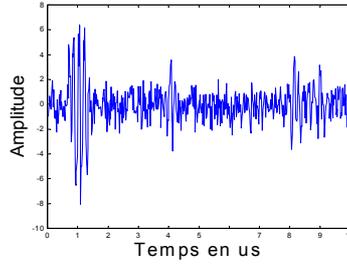
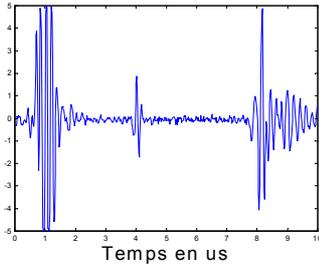


FIG. 1 : Echo d'acier contenant un défaut. FIG. 2 : Echo de laiton contenant un défaut. FIG. 3 : Echo de fonte contenant un défaut.

Cette dépendance vis-à-vis du temps du contenu spectral des échos est qualifiée de non-stationnaire, pour cela plusieurs études ont montré que l'utilisation de l'analyse temps-échelle est la plus appropriée pour l'analyse des signaux mis en jeux [3], [4].

Plusieurs expériences ont été réalisées sur des pièces et joints soudés contenant des défauts, grâce au concours apporté par le Centre de Soudage de Chéraga (CSC- Alger). Les figure (FIG.1 à 3) montrent quelques exemples d'échos obtenus expérimentalement.

3. Le filtrage dans le domaine Temps-Echelle

Plusieurs méthodes, basées sur la manipulation des coefficients en ondelettes, ont émergées. Elles sont, en général, vues comme une opération de classification binaire : les coefficients sont classés en deux groupes. Le premier groupe contiendra les coefficients dits « réguliers » dus au signal sous-jacent (propre). Le second contiendra ceux catalogués comme du bruit pur. Plusieurs critères de classification sont possibles :

1. Certaines méthodes se basent sur le calcul des exposants de Hölder, elles proposent que le bruit soit moins régulier que les signaux naturels donc caractérisé par des exposants plus petits [7].

2. D'autres utilisent la valeur absolue des coefficients comme mesure de régularité : les coefficients d'amplitudes les plus importants sont les plus réguliers [8].

Le présent travail traite des méthodes basées sur le deuxième critère, dites par seuillage. Deux types de seuillage existent :

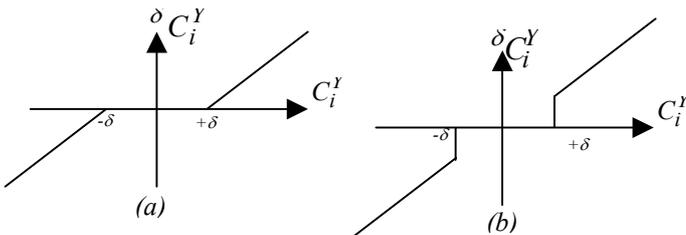


FIG. 4 : (a) Seuillage « soft », (b) Seuillage « hard ».

a. *Le seuillage soft* : Si un coefficient du signal de l'observation soit inférieur à un certain seuil, il est considéré comme étant du bruit pur et est remplacé par zéro, sinon il est rétréci de la valeur du seuil (FIG. 4.a)

$$\begin{cases} \delta C_i^Y = \text{sgn}(C_i^Y) (|C_i^Y| - \delta), & \text{si } |C_i^Y| \geq \delta ; \\ \delta C_i^Y = 0, & \text{si } |C_i^Y| < \delta . \end{cases} \quad (1)$$

b. *Le seuillage hard* : Si un coefficient du signal de l'observation soit inférieur à un certain seuil, il est considéré comme étant du bruit pur et est remplacé par zéro, sinon il est gardé tel qu'il est (FIG. 4.b).

$$\begin{cases} \delta C_i^Y = C_i^Y, & \text{si } |C_i^Y| \geq \delta ; \\ \delta C_i^Y = 0, & \text{si } |C_i^Y| < \delta . \end{cases} \quad (2)$$

Une question naturelle se pose cependant : Comment est-elle choisie la valeur du seuil de décision ? C'est par la réponse à cette question que diffère une méthode d'une autre. Dans ce travail, la méthode présentée est basée sur la fonction (GCV) « Generalized Cross Validation » [9].

4. Filtrage des échos par la méthode GCV

Le but recherché ici est de retrouver le signal f , déterministe mais inconnu, noyé dans un bruit n après avoir observé le signal y . Le modèle d'observation considéré est de la forme :

$$y(k) = f(k) + n(k), \quad k = 1, \dots, N \quad (3)$$

Du fait de sa linéarité, la TOD de y s'écrit :

$$C_i^Y = C_i^f + C_i^n, \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

Le problème de filtrage dans le domaine temporel est donc ramené à un problème similaire dans le domaine ondelettes : écarter les coefficients C_i^n du bruit, ne garder que les coefficients C_i^f représentant le signal propre [10].

Les méthodes de filtrage par seuillage se propose de trouver le seuil δ qui optimise un certain critère $C(f, \hat{f}_\delta)$ avec \hat{f}_δ l'estimé de f . Par exemple, l'estimateur SURE (Stein Unbiased Risk Estimate), proposé par Donoho et Johnstone [11], choisit un seuil qui minimise la fonction risque $R(\delta)$.

$$R(\delta) = R(f, \hat{f}_\delta) = E \left\{ \left\| f - \hat{f}_\delta \right\|^2 \right\} \quad (5)$$

Soit : $\delta = \arg \min_{\delta} \{ R(\delta) : \delta \in \mathfrak{R}^+ \}$.

Puisque f est inconnu, il est impossible de minimiser la fonction risque R . La solution est d'utiliser un estimateur de cette fonction. On considère le problème posé avec les hypothèses suivantes : le bruit est blanc gaussien (théorème limite centrale), de variance σ^2 , de réalisations indépendantes et identiquement distribuées $n(k) \stackrel{iid}{\sim} N(0, \sigma)$.

Après avoir appliqué le seuillage aux coefficients de l'observation, on obtient les coefficients modifiés sur lesquels l'application de la TOD inverse donne le signal filtré. La valeur du seuil est choisie de sorte à minimiser la fonction GCV définie comme suit [9] :

$$GCV(\delta) = \frac{\frac{1}{N} \left\| \delta C_i^y - C_i^y \right\|^2}{\left| \frac{N_0}{N} \right|^2} \quad (6)$$

Où N_0 est le nombre de coefficients remplacés par zéro et N le nombre de coefficients total. Soit : $\delta^* = \arg \min_{\delta} \{ GCV(\delta) : \delta \in \mathfrak{R}^+ \}$, Le théorème suivant montre que cette méthode est asymptotiquement optimale, i.e., lorsque N est grand, le seuil δ^* minimise également la fonction risque : $R(\delta) = E \left\{ \left\| f - \hat{f}_\delta \right\|^2 \right\}$.

Théorème. Si $\delta^* = \arg \min_{\delta} \{ GCV(\delta) : \delta \in \mathfrak{R}^+ \}$ et $\tilde{\delta} = \arg \min_{\delta} \{ R(\delta) : \delta \in \mathfrak{R}^+ \}$, alors $\frac{E \{ R(\tilde{\delta}) \}}{E \{ R(\delta^*) \}} \rightarrow 1$, lorsque $N \rightarrow \infty$.

Au voisinage de δ^* , on a [8] : $E \{ GCV(\delta) \} = E \{ R(\delta) \} + \sigma^2$.

L'estimateur GCV est construit autour du fait qu'un estimateur du risque R est donné par :

$$SURE(\delta) = \frac{1}{N} \left\| \delta C_i^y - C_i^y \right\|^2 + \frac{N - 2N_0}{N} \sigma^2 \quad (7)$$

L'utilisation propre de l'estimateur GCV impose donc que le bruit soit stationnaire dans le domaine ondelettes. Par conséquent, la TOD doit être orthogonale, du moment que la TOD non orthogonale d'un bruit stationnaire est un bruit non stationnaire [12]. Lorsque le taux du bruit est différent pour chaque coefficient, il est clair que cette méthode échoue, c'est le cas d'un bruit corrélé. La procédure GCV a été modifiée selon le lemme suivant :

Lemme. Si $C_{i,j}^n$ est un coefficient en ondelettes d'un bruit n à la position i , à la résolution j , sa variance ne dépend que de j .

Ce lemme suggère d'utiliser à chaque niveau de résolution un seuil différent, choisi de sorte à minimiser la GCV modifiée [9] :

$$GCV_j(\delta_j) = \frac{\frac{1}{N_j} \left\| \delta C_{i,j}^y - C_{i,j}^y \right\|^2}{\left| \frac{N_{0j}}{N_j} \right|^2} \quad (8)$$

Soit : $\delta_j^* = \arg \min_{\delta_j} \{ GCV_j(\delta_j) : \delta_j \in \mathfrak{R}^+ \}$.

5. Algorithme final de filtrage

L'algorithme pratique de programmation de la méthode GCV est le suivant :

1. Calculer la TOD par l'algorithme en multirésolution (S-Mallat) de l'écho ultrasonore ;
2. Affecter arbitrairement les valeurs pour le seuil δ ;
3. Pour la première échelle de décomposition, on applique le seuillage Soft sur les coefficients d'ondelettes obtenues dans (1) ;
4. Calculer la GCV ;
5. Chercher le seuil optimal qui minimise la fonction GCV ;
6. Appliquer ce seuil optimal aux coefficients de la première échelle (si le signal est trop bruitée, on cherche d'autres seuils optimaux aux autres échelles) ;
7. Reconstruire le signal filtré à base des nouvelles données.

6. Résultats et discussion

Les résultats obtenus par l'utilisation de l'algorithme de S. Mallat sur les échos filtrés par la méthode GCV (FIG.5 et FIG.6), montrent que cette approche donne une meilleure représentation du signal analysé. On constate que le bruit affectant le signal est pratiquement réduit. Par conséquent la GCV améliore considérablement le rapport signal sur bruit (RSB). Donc cette méthode permet la séparation du bruit et le reste du signal utile (propre). Ce qui aide considérablement à la localisation du défaut.

Le bruit affecte tous les coefficients, sa structure est irrégulière, de plus son énergie se concentre aux premiers niveaux de résolution, seuls ces niveaux sont alors seuillés, car ce bruit est de type haute fréquence.

L'avantage majeur de la méthode GCV c'est qu'elle n'a guère besoin d'a priori sur l'énergie du bruit. Son problème, c'est qu'elle a besoin d'un grand nombre d'échantillons et ne convient donc pas aux échelles grossières.

Les résultats de ce filtrage nous ouvrent la voie à traiter ce type d'échos pour d'autres applications ultérieures à savoir la classification des défauts détectés, ceci après construction d'une base de données type (échos filtrés).

La localisation des défauts est faite selon le théorème des moments [3] : La transformée en ondelettes permet de révéler l'aspect irrégulier des signaux. Pour cela, elle exhibe aux petites échelles, des coefficients de grande amplitude là où le signal est irrégulier, et des coefficients nuls ou quasi nuls là où il est régulier. En exploitant ce principe, on remarque que le pic de l'écho de défaut est maximal à l'échelle 3 : [3.1, 6.25] Mhz, sachant que cette échelle contient la fréquence d'excitation (5 Mhz), c'est à cette échelle que la probabilité de détecter le défaut est maximale. Comme cette échelle correspond à une bande de fréquence, on peut localiser ce défaut simultanément en fréquence et en temps.

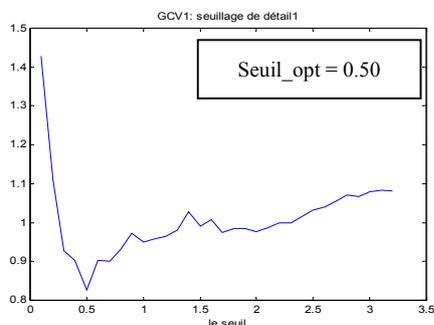
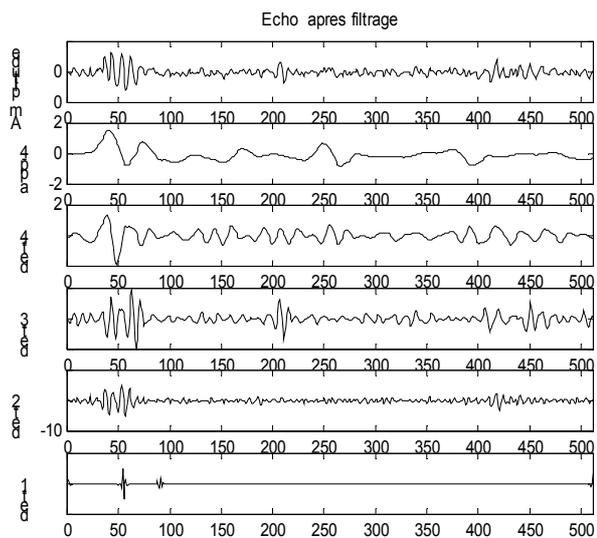


FIG. 5 : La courbe GCV du 1^{er} détail de l'écho de fonte en fonction du seuil δ .



Entre 100 et 400 échantillons on trouve :

$ \text{Max}(cd2) = 1.41$; $ \text{Max}(cd3) = 3.49$; $ \text{Max}(cd4) = 0.74$.
--

FIG. 6 : Analyse par l'algorithme de S-Mallat de l'écho de fonte après filtrage.

7. Conclusion

L'objectif principal de ce travail est d'expérimenter des outils de traitement numériques des signaux pour une caractérisation ultrasonore des matériaux, pour cela, nous avons utilisé des méthodes basées sur l'analyse et le filtrage dans le plan temps-échelle. Nous avons appliqué les approches proposées, sur les échos provenant des pièces et joints soudés présentant des défauts noyés dans du bruit de structure et de la chaîne d'acquisition. Les résultats obtenus ont donné satisfaction, au vu de l'avis d'experts en CND.

Par ailleurs, nous avons vu que les coefficients en Ondelettes tendent à se propager à travers les échelles, ils sont départagés en deux groupes. Le premier contient les coefficients dits réguliers dus au signal propre, le second contient ceux catalogués comme du bruit pur. Le bruit est une structure irrégulière, son énergie se trouve essentiellement aux premiers niveaux de décomposition, pour cela, seul ces niveaux sont alors seuillés. La procédure GCV est la plus

adéquate pour le filtrage de ce type d'écho, elle est plus recommandée, car elle possède l'avantage d'estimer la valeur du seuil optimal sans avoir recours à l'estimation de la puissance du bruit. Ces résultats nous encouragent à tester d'autres technique de filtrage toujours dans le plan temps-échelle à savoir la méthode MMDL (Minimax Description Length) et par seuil universel de Donoho, ainsi que mener d'autres expériences sur une base de données plus riche, afin d'intégrer cette procédure dans le contrôle industriel.

Références

- [1] M.Lacroix. *Essais non destructifs*. Techniques de l'ingénieur Vol. M1 Métallurgie PM 110-1 PM 110-21, 1986.
- [2] F.Tafinine, A.Houacine. *L'apport des techniques de traitement numérique du signal dans le contrôle ultrasonore des matériaux*. CGE'02 EMP- Alger, Décembre 2002.
- [3] F.Tafinine, A.Houacine. *Amélioration de la caractérisation de matériaux en CND par l'introduction de l'algorithmme à Trous en analyse des échos ultrasonores*. IEEE, Conférence Internationale SETIT'04 (Sousse)- TUNISIE, 15-20 Mars 2004.
- [4] A.Abbate, J.Koay, J.Frankel, S.Schroeder. *Signal detection and noise suppression using a wavelet transform signal processor : Application to ultrasonic Flaw detection*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control, Vol. 44, No 1, pp. 14 – 25, January 1997.
- [5] C.H.Chen, G.G.Lee. *Neural Networks for ultrasonic NDE signal classification using Time-Frequency analysis*. IEEE, ICASSP, pp. I.493 - I.496, USA 1993.
- [6] R.Drai, M.Khelil, A.Benchaala. *Flaw detection in ultrasonics using wavelets transform and Split spectrum processing*. 15th WCNDT Roma, Octobre 2000.
- [7] S.Mallat, W.L.Hwang. *Singularity detection and processing with wavelets*. IEEE Trans. Theory, Vol.38, No 2, pp. 617- 643, 1992.
- [8] Q.Pan, L.Zhang. *Two denoising methods by wavelet transform*. IEEE Trans. Signal Proc. Vol.47, No 12, 1999.
- [9] N.Meyrich, G.T.Warhola. *Wavelet shrinkage and generalized cross validation for image denoising*. IEEE Trans. Image Proc. Vol.7, No 1, pp. 82- 90, 1998.
- [10] H.Krim, I.C.Schik. *Robust wavelet thresholding for noise suppression*. ICASSP'97, IEEE 1997.
- [11] D.L.Donoho. *Denoising by soft thersoolding*. IEEE Trans. Info Theory, Vol. 41, No 3, pp. 613-627, 1995.
- [12] Y.T.Chan. *Wavelet basics*. Edition, Kluwer Academic Publishers, USA 1996.