

Traitement d'échogrammes ultrasonores par déconvolution aveugle

Stéphane Gautier^{1,2}, Jérôme Idier², Frédéric Champagnat^{2,+}, Ali Mohammad-Djafari², Blandine Lavayssière¹

1 : EDF-DER, Service Ensembles de Production, 6 quai Watier, F 78401 Chatou Cedex. Stephane.Gautier@der.edfgdf.fr

2 : Laboratoire des Signaux et Systèmes, Supélec, Plateau de Moulon, F 91192 Gif sur Yvette Cedex

+ : actuellement, Matra Cap Systèmes, LTIS, 6 rue Dewoitine BP14, F 78142 Velizy Villacoublay Cedex

RÉSUMÉ

La génération de traces ultrasonores peut être modélisée comme une convolution entre l'onde émise et la réflectivité qui caractérise le milieu insonifié. Lorsque l'onde est inconnue, la restitution de la réflectivité constitue un problème de déconvolution myope. Dans ce cas, la démarche la plus courante consiste à déconvoluer la trace en utilisant l'ondelette à minimum de phase. En fait, cette hypothèse sur la phase n'est pas satisfaisante. Nous présentons deux méthodes qui permettent, dans certaines conditions, de pallier cette méconnaissance. La première méthode consiste à estimer conjointement une ondelette à phase non minimale et la réflectivité. La seconde prend en compte d'éventuelles rotations de phases de l'onde lors de sa propagation. Les résultats obtenus sont validés par le traitement de traces réelles.

1 Introduction

L'objectif du travail présenté est le développement d'une méthode de déconvolution aveugle pour le contrôle non destructif de pièce en acier austéno-ferritique à partir de signaux ultrasonores. Les échogrammes sont obtenus à la surface supérieure de la pièce, avec un capteur ultrasonore à incidence normale.

L'objet est caractérisé par sa fonction de réflectivité, qui représente les discontinuités dans le milieu ; la séquence de réflectivité r , située à la verticale du capteur, est indirectement observée *via* la trace échantillonnée z . On suppose que z est le résultat de la convolution monodimensionnelle et discrète entre la séquence r et l'ondelette h émise par le capteur ; à ce résultat de convolution s'ajoute un bruit n que l'on suppose indépendant de r , blanc et gaussien. Le but du traitement est d'estimer la réflectivité r , pour recouvrir d'éventuelles discontinuités dans le milieu. Dans certains cas "favorables", il est possible d'identifier l'ondelette à partir d'un défaut ponctuel connu, ou à partir de l'écho de fond. Pour ce qui nous concerne, l'ondelette est inconnue et il nous faut donc également estimer h : nous sommes donc confrontés à un problème de déconvolution aveugle. Dans un premier temps, l'onde est supposée stationnaire c'est-à-dire qu'elle est constante au cours de sa propagation.

Lorsqu'on dispose d'un nombre de points suffisamment grand, il est possible d'estimer l'ondelette par des méthodes faisant appel aux ordres supérieurs. Comme nous ne disposons que d'une centaine de points, ce type d'approche ne semble pas convenir à notre application

ABSTRACT

Ultrasonic traces can be supposed to result from the convolution between the propagation wavelet and the reflectivity that represent the inhomogeneities. The wavelet is often unknown; thus the recovery of the reflectivity requires a blind deconvolution process. In such a case, it is common to estimate a minimum-phase wavelet and then to restore the reflectivity. In fact, there is no reason why the wavelet should have minimal phase. We propose two blind deconvolution methods that enable the recovery of the wavelet's phase. The first consists in estimating jointly the reflectivity and the wavelet. The second method proposes to refine the knowledge of the convolution kernel by accounting for kernel waveshifts.

[LAZ 93]. Plus classiquement, l'ondelette est identifiée par déconvolution prédictive [ROB 67]. Dans cette approche, le bruit n n'est pas pris en compte. Le filtrage de la réflectivité par l'ondelette est représenté par un filtre auto-régressif. L'identification des coefficients AR permet d'obtenir le spectre en amplitude de l'ondelette. Généralement, on choisit alors l'ondelette "à phase minimale", c'est-à-dire que l'on développe le filtre AR causal et stable. En fait, en sortant un ou plusieurs pôles à l'extérieur du cercle unité, on pourrait obtenir, par transformée de Fourier inverse, une ondelette à phase non minimale de même spectre d'amplitude. Puisque seul le spectre en amplitude de l'ondelette est connu, rien ne permet de privilégier une solution particulière ; le choix de l'ondelette à minimum de phase est donc tout-à-fait arbitraire.

Pour nos applications, l'utilisation de l'ondelette à phase minimale dans l'étape de déconvolution provoque des dédoublements des discontinuités [GAU 95]. Nous avons montré que ces anomalies peuvent s'expliquer par la mauvaise connaissance de l'ondelette [GAU 96]. Dans cette communication, nous présentons deux méthodes qui permettent, dans certaines conditions, de pallier cette méconnaissance. La première méthode consiste à estimer conjointement une ondelette stationnaire (à phase non minimale) et la réflectivité. La seconde permet de prendre en compte d'éventuelles rotations de phases de l'onde lors de sa propagation. Dans chaque cas, nous sommes confrontés à un problème mal-posé qui est régularisé par l'introduction d'informations *a priori* sur les paramètres à estimer [DEM 89]. Les résultats obtenus sont validés par le traitement de traces réelles.

2 Estimation conjointe de l'ondelette et des réflectivités

Nous étudions une méthode de déconvolution myope qui estime conjointement l'ondelette et la réflectivité, à partir d'une trace. Cette approche reprend un travail mené par Goussard [GOU 89], dans le cas où la réflectivité est modélisée *a priori* par un processus Bernoulli-gaussien. Une approche similaire a été proposée récemment en traitement d'image [YOU 96].

Afin de prendre en compte le caractère impulsif de la réflectivité, nous la modélisons par un processus blanc de loi gaussienne généralisée [GAU 93]. S'agissant des informations *a priori* sur l'ondelette, l'ondelette est supposée être à la fois douce et centrée. Ces informations sont introduites *via* une densité gaussienne. L'estimateur MAP retenu minimise conjointement le critère $J(\mathbf{r}, \mathbf{h})$ suivant :

$$J(\mathbf{r}, \mathbf{h}) = \|\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{r}\|^2 + \lambda \sum_i |r_i|^p + \mu \mathbf{h}'\mathbf{Q}\mathbf{h} + \gamma \mathbf{h}'\mathbf{h}, \quad p > 1,$$

où \mathbf{Q} est une matrice de douceur, et λ, μ, γ désignent des hyperparamètres. La matrice \mathbf{H} est constituée des échantillons de l'ondelette \mathbf{h} à estimer.

Si le critère est séparément convexe en \mathbf{h} et \mathbf{r} , il n'est sans doute pas globalement convexe. Ainsi, il possède sans doute de nombreux minima locaux et des points selles. Par exemple, le point $(\mathbf{0}, \mathbf{0})$ est un point fixe (point où le gradient est nul en \mathbf{h} et \mathbf{r}) et l'on s'aperçoit dans la pratique, qu'il est possible de trouver d'autres points pour lesquels la valeur du critère est plus petite qu'en $(\mathbf{0}, \mathbf{0})$. De plus notons que l'ondelette et la réflectivité estimées sont obtenues au signe près : le critère présente deux pans symétriques en \mathbf{h} et \mathbf{r} .

Comme le critère est convexe selon les deux inconnues prises séparément, nous choisissons d'obtenir la solution en minimisant successivement le critère selon \mathbf{h} et \mathbf{r} . Cette stratégie est séduisante car elle assure que la valeur du critère diminue après chaque itération. Cependant, la solution peut facilement rester bloquée sur un point selle ; ainsi, il serait également intéressant de retenir un algorithme de gradient global qui permettrait d'éviter les points selles. Pratiquement, la méthode "converge" : la solution correspond à un minimum local ou un point selle. L'algorithme est initialisé par une réflectivité nulle. Comme le critère n'est pas convexe en (\mathbf{r}, \mathbf{h}) , la solution obtenue dépend du point initial.

Nous présentons ci-dessous des résultats de simulation (cf. fig. 1 et 2). On considère une séquence de réflectivité initiale de Mendel qui est convoluée avec l'ondelette de Kramer ; le résultat de la convolution est entaché par un bruit additif blanc et gaussien (RSB = 10dB). L'algorithme est initialisé par l'ondelette à phase minimale estimée par prédiction linéaire de la trace. La séquence de réflectivité restituée est proche (à un facteur multiplicatif près) de la séquence de Mendel, semblable à la séquence de Mendel initiale (cf. fig. 1 et 3). De plus, il s'agit d'une amélioration par rapport à

une déconvolution stricte $L2+Lp$ [GAU 95] pour laquelle le noyau constant est l'ondelette à phase minimale (cf. fig. 1, 3 et 4). Parallèlement, l'ondelette obtenue est en retard d'un échantillon mais reste qualitativement proche (à un facteur multiplicatif près) de l'ondelette de Kramer (cf. fig. 5). Ces résultats, ainsi que d'autres simulations, permettent de conclure que lorsque les hypothèses du modèle de convolution sont correctement respectées, cette méthode permet bien de recouvrer la phase de l'ondelette. En revanche, le traitement de traces réelles n'est pas satisfaisant pour notre application : il est probable que l'onde se déforme lors de sa transmission dans le milieu, et cette déformation ne peut pas être prise en compte par le modèle de convolution choisi.

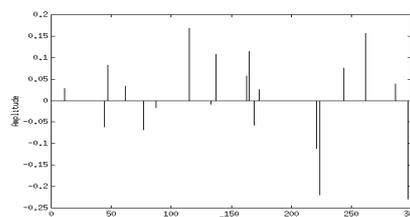


Fig. 1 : Séquence de Mendel

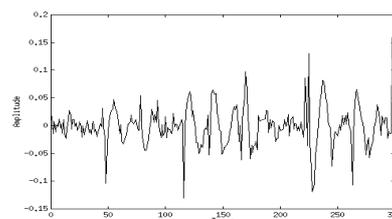


Fig. 2 : Trace traitée

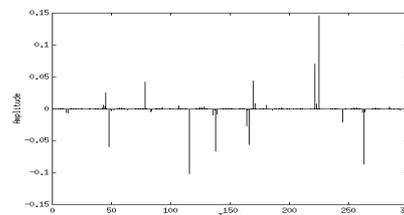


Fig. 3 : Réflectivité obtenue par estimation conjointe

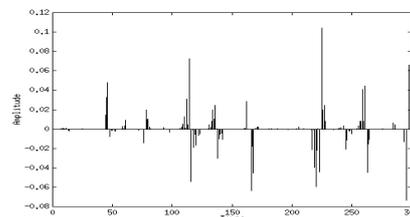


Fig. 4 : Réflectivité obtenue par déconvolution " stricte "

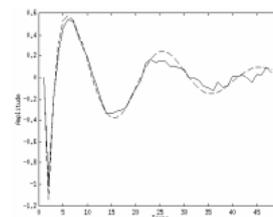


Fig. 5 : Superposition de l'ondelette de Kramer (- -) et de l'ondelette estimée, retardée d'un échantillon (-).

3 Déconvolution double hyperbolique

Nous proposons ici de prendre en considération une déformation en phase de l'ondelette, lors de sa propagation. Ce phénomène de rotation de phase a été remarqué par Champagnat *et coll.* [CHAMP 93], et abordé par déconvolution double Bernoulli-gaussienne en tirant partie de la remarque suivante : un signal dont la phase a été décalée d'une constante, ce qui correspond à une rotation de phase, s'exprime comme une combinaison linéaire du signal initial et de la composante en quadrature. Ainsi, comme le modèle de convolution est également linéaire, on peut reporter une rotation de la phase de l'ondelette sur une séquence de réflectivité dédoublée (r, s) . On peut alors introduire un modèle direct de convolution, suivant lequel r et s sont respectivement convolués par l'ondelette et sa transformée de Hilbert selon : $z = Hr + Gs + n$, où z est la trace observée, H est la matrice de convolution qui correspond à l'ondelette connue, G est la matrice de convolution associée à la l'ondelette en quadrature et n est un bruit blanc, centré, gaussien et indépendant de r et s . Cette modélisation correspond à un enrichissement du modèle direct par rapport au modèle de convolution simple : l'introduction d'une double réflectivité intervient pour modéliser simplement les phénomènes de rotation de phase de l'ondelette. La solution est alors définie par :

$$(\hat{r}, \hat{s}) = \arg \min_{r, s} \left\{ \|z - Hr - Gs\|^2 + \lambda \rho(r, s) \right\},$$

où λ est un paramètre de régularisation et $\rho(r, s)$ permet d'intégrer des informations *a priori* sur (r, s) .

S'agissant des informations *a priori*, on peut supposer que la réflectivité est impulsionnelle et que les réflectivités r et s sont corrélées : en effet, en supposant la phase équirépartie, la fonction $\rho(r, s)$ est sphérique. Or la seule loi sphérique à composantes indépendantes est la loi gaussienne. Nous avons choisi d'introduire ces informations *a priori* sous la forme du potentiel convexe suivant :

$$\rho(r, s) = \sum_i \sqrt{T^2 + r_i^2 + s_i^2},$$

où T permet de régler la largeur de la partie quadratique du potentiel *a priori*.

Le critère à minimiser est alors conjointement convexe en r et s et la solution peut être obtenue par un algorithme de descente, du type gradient conjugué. Eu égard au potentiel *a priori* retenu, la méthode est appelée déconvolution *double hyperbolique*.

Nous présentons ci-dessous des résultats de déconvolution pour une trace réelle obtenue lors du contrôle d'un bloc en acier austéno-ferritique présentant un défaut électro-érodé (*cf.* fig. 6). On voit successivement apparaître (*cf.* fig. 7) un écho principal qui correspond au bord supérieur du défaut (les ultrasons ne se propagent pas dans l'air) et l'écho de fond de pièce. Le noyau utilisé pour la déconvolution

est l'ondelette à phase minimale obtenue par déconvolution prédictive (12 coefficients auto-régressifs). Le caractère bivarié du résultat n'étant dû qu'à l'artifice employé pour prendre en compte simplement des rotations de phase de l'ondelette, la solution est représentée par le module du couple (\hat{r}, \hat{s}) . Par rapport au résultat de déconvolution stricte L2+Lp [GAU 95] (*cf.* fig. 8 et 10), on ne voit plus apparaître qu'un seul pic correspondant au bord supérieur du défaut (*cf.* fig. 9). De plus, ce pic n'est étalé que sur deux échantillons : il est donc nettement plus concentré que les pics de la déconvolution L2+Lp qui sont séparés par une dizaine d'échantillons. Cela constitue un progrès appréciable, dans la mesure où le résultat est plus tranché.

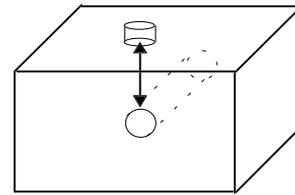


Fig. 6 : Pièce inspectée présentant un défaut électro-érodé

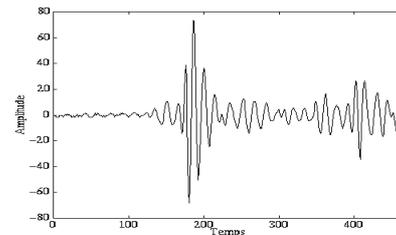


Figure 7 : Trace réelle traitée

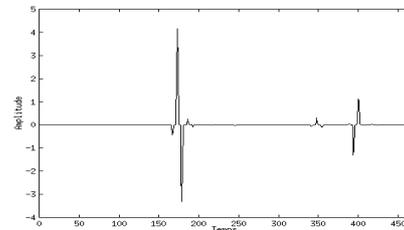


Fig. 8 : Déconvolution L2+Lp

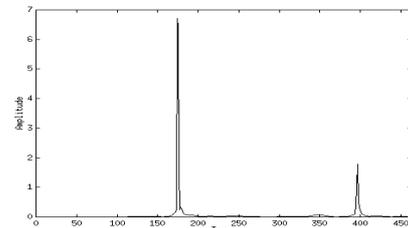


Fig. 9 : Déconvolution double hyperbolique

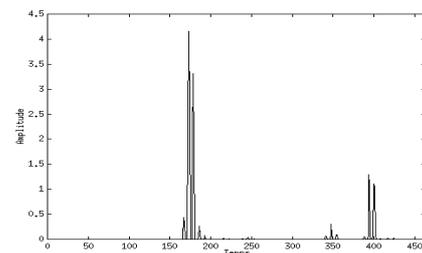


Fig. 10 : Norme de la déconvolution L2+Lp

4 Conclusion

Deux points de vue ont été présentés successivement, dans l'optique d'un traitement réaliste d'échogrammes ultrasonores. Le premier aboutit à une méthode de déconvolution aveugle au sens strict, dans laquelle ondelette inconnue et séquence de réflectivité sont estimées conjointement par MAP conjoint. Les résultats sont satisfaisants en simulation, mais décevants sur données réelles. Comme [CHAMP 93], nous attribuons cette contre-performance à l'inadéquation du modèle de convolution.

En l'absence d'un modèle physique de déformation de l'ondelette au cours de la propagation et des transmissions successives, un degré de liberté supplémentaire est introduit lors de chaque réflexion, sous la forme d'une rotation de phase inconnue. En conséquence, la minimalité de la phase de l'ondelette identifiée par déconvolution prédictive n'est plus un handicap, et nous avons montré que la minimisation d'un critère convexe permet de restituer un résultat de bonne qualité lors du traitement de données réelles. Cette approche économique et robuste contourne le problème de l'identification d'un noyau de convolution à phase non minimale, puisqu'elle ne nécessite que la connaissance de son spectre. Elle intéresse non seulement le contrôle non-destructif, mais également la sismique-réflexion et l'imagerie médicale, qui mettent en jeu des phénomènes propagatifs comparables.

Bibliographie

- [CHAMP 93] F. Champagnat, J. Idier, G. Demoment. Deconvolution of sparse spike trains accounting for wavelet phase shifts and colored noise. *Proc. Int. Conf. ASSP*, Minneapolis, Minnesota, 1993.
- [DEM 89] G. Demoment. Image reconstruction and restoration: overview of common estimation structures and problems. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. 38:2024-2036, 1989.
- [GAU 95] S. Gautier, G. Le Besnerais, A. Mohammad-Djafari, B. Lavayssière. Vers la fusion de données gammagraphiques et ultrasonores. *Actes 15ième Coll. GRETSI*, pp. 869-872, 1995.
- [GAU 96] S. Gautier. *Fusion de données ultrasonores et gammagraphiques. Application au contrôle non destructif*. Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay, 1996.
- [GOU 89] Y. Goussard. *Déconvolution de processus aléatoires non-gaussiens par maximisation de vraisemblance*. Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay, 1989.
- [LAZ 93] G. D. Lazear. Mixed-phase wavelet estimation using fourth-order cumulants. *Geophysics*, vol. 58:1042-1049, 1993.
- [ROB 67] E. A. Robinson. Predictive decomposition of time series with application to seismic exploration. *Geophysics*, vol. 32:418-484.
- [YOU 96] Yu-Li You, M. Kaveh. A regularization approach for joint blur identification and image restoration. *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 5:416-428, 1996.