

UNIVERSITÉ DU MAINE
UFR SCIENCES ET TECHNIQUES
MASTER ACOUSTIQUE 2^{ÈME} ANNÉE

RAPPORT DE STAGE

Imagerie ultrasonore par inversion de formes d'onde

Alice DINSENMEYER

encadrée par :

Romain BROSSIER et Ludovic MOREAU
Maîtres de conférence, ISTerre

Année universitaire 2015-2016



Chapitre 1

Techniques d'imagerie par ultrasons

L'objectif de ce chapitre est de présenter les principales méthodes multi-éléments utilisées pour l'imagerie ultrasonore.

Les transducteurs multi-éléments sont d'abord utilisés dans les années 70 pour l'imagerie médicale et sont aujourd'hui largement utilisés en contrôle de pièces industriels. Les éléments étant pilotables indépendamment, il est possible de leur appliquer une loi de retard permettant d'orienter le front d'onde ou de focaliser le faisceau excitateur. Cela permet notamment d'améliorer le rapport signal sur bruit et peut représenter un gain de temps car le balayage d'une pièce à inspecter peut être réalisé sans déplacement du transducteur.

En réception, ces transducteurs permettent de réaliser de la formation de voie dont on distingue trois principaux types de méthodes :

- les méthodes par retard et sommation,
- les méthodes dites "haute résolution",
- les méthodes basées sur la résolution de problème d'optimisation.

1.1 Représentation des données temporelles

Lorsque l'onde est perturbée par un changement des propriétés élastiques de son support, il est possible de l'observer directement sur les signaux temporels mesurés. Pour cela, différents modes de représentation sont utilisés. Les échographies peuvent être représentées en un point d'observation (Ascan), sur une ligne de balayage (Bscan) équivalent à une coupe transversale de la pièce, sur un plan de balayage (Cscan et Dscan) donnant une vue de surface et ne permettant pas une localisation en profondeur d'un réflecteur (cf figure 1.1).

Ce type d'analyse peut être réalisé avec des transducteurs mono-éléments. L'obtention d'une image 2D nécessite alors un balayage sur l'ensemble d'une surface de la pièce à contrôler.

En revanche, le Sscan ne peut être réalisé qu'avec des transducteurs multi-éléments. Il correspond à un ensemble de Ascans réalisés sans déplacement du transducteur mais en appliquant une loi de retard aux éléments permettant de réaliser un balayage du point

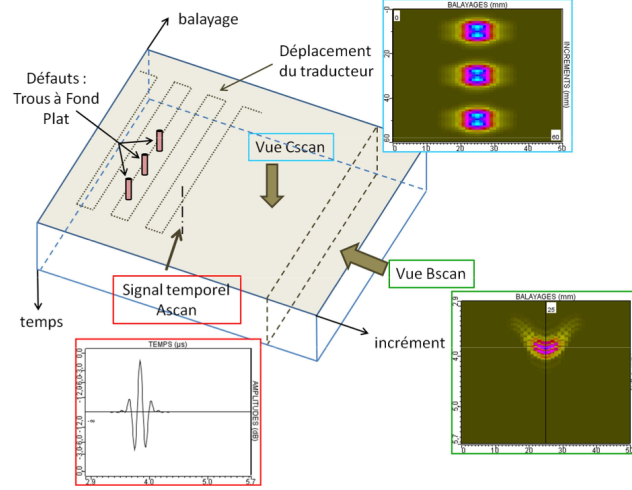


FIGURE 1.1 – Schéma des différents modes de représentation des signaux temporels (extrait de [Bannouf \(2013\)](#)).

focal. Le Sscan permet donc d’imager des pièces partiellement accessible, et augmente la probabilité de repérer un défaut en offrant plusieurs angles d’observation.

Cependant, la localisation dans la pièce des réflecteurs à l’origine des différents échos visibles sur les signaux temporels mesurés n’est possible que si la vitesse de propagation des ondes est connue. Les Bsans dits "vrais" sont des Bscans sur lesquels des corrections liées à la vitesse ou à l’angle d’incidence sont appliqués.

1.2 Méthodes par retard et sommation

Ces données temporelles peuvent aussi être post-traitées de manière à obtenir une représentation spatiale de la pièce. Si la vitesse du milieu de propagation est connue, une analyse des temps de vol des échos permet en effet d’établir une carte du milieu.

Il est aussi possible de sommer un ensemble de Ascans de façon cohérente, permettant ainsi de reproduire une focalisation en tous points de la zone à inspecter. C’est que proposent la méthode Synthetic Aperture Focusing Technique ([Doctor et al., 1986](#)) à partir des signaux recueillis par un mono-éléments. Ce procédé est généralisé à un ensemble de capteurs et d’émetteurs dans la méthode Total Focusing Method ([Holmes et al., 2005](#)).

L’intensité I de l’image obtenue au point de coordonnées \mathbf{r} est alors donnée par la relation suivante :

$$I(\mathbf{r}) = \sum_r \sum_t s_{r,t} \left(\frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_r| + |\mathbf{r} - \mathbf{r}_t|}{c} \right),$$

où \mathbf{r}_r et \mathbf{r}_t sont les positions des récepteurs et des émetteurs, $s_{r,t}$ sont les signaux temporels pour chaque couple émetteur-récepteur et c est la vitesse de l’onde dans le milieu de propagation.

Cette focalisation permet donc de couvrir l’ensemble du volume de la pièce car tous les angles peuvent être balayés, indépendamment de l’ouverture du capteur, ce qui permet une meilleure résolution que celle obtenue avec des Bscans.

1.3 Méthodes hautes résolution

Des méthodes de localisation de sources dites "hautes résolutions" exploitent l'ensemble des covariances des signaux temporels. Les méthodes telles que MULTIPLE Signal Classification (Schmidt, 1986) et Capon (Capon, 1969) proposent une décomposition en valeurs propres de cette matrice de covariance afin d'en extraire deux sous-espaces bruit et signal, diminuant ainsi la contribution énergétique du bruit.

La méthode de Décomposition de l'Opérateur de Retournement Temporel (Prada et al., 2002) propose, de la même façon, d'interpréter l'opérateur de retournement temporel comme une matrice de covariance et de la décomposer. Cette dernière méthode est particulièrement adaptée aux milieux hétérogènes et/ou à géométrie complexe, puisqu'elle tire profit des réflexions multiples.

Tous comme les méthode de formation de voies classiques, il est nécessaire de connaître les propriétés élastiques du milieu de propagation pour pouvoir localiser précisément les réflecteurs.

spectral decomposition of a covariance matrix

dort : permet de distinguer 2 sources dort : opérateur de retournement temporel peut être interprété comme une matrice de covariance dort : adapté en milieu hétérogène a géométrie complexe, puisque tire profit des réflexions multiples. "They are all based on an a priori knowledge of the geometry and acoustic properties of the sample and assume that the ultrasound velocity is known and constant in each medium" prada 2002 complexe=environnement diffus, ou plaque mince (onde de lamb)

amélioration de résolution et de RSB limitation par la taille de l'antenne

1.4 Résolution de problème d'optimisation

L'objectif de ces méthodes est de résoudre un problème inverse en minimisant une fonction coût traduisant l'écart entre le modèle calculé et le modèle vrai (Tarantola, 2005). Le modèle est décrit par un nombre fini de paramètres \mathbf{m} qui sont liés à des observables \mathbf{d}_{obs} par l'intermédiaire de lois physiques \mathbf{g} . La résolution du problème inverse consiste donc à trouver les paramètres \mathbf{m} optimaux à partir des données $\mathbf{d}_{obs}(\mathbf{m})$ (cf schéma de la figure 1.2).

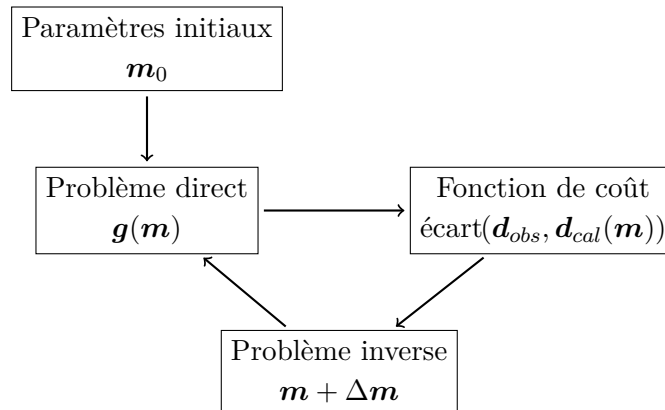


FIGURE 1.2 – Schéma de résolution d'un problème d'optimisation.

Ces problèmes sont en général non-linéaire, car les observables ne dépendent pas linéairement des paramètres du modèle. De plus, si le nombre de paramètre est grand, ils sont également mal posés.

1.4.1 Résolution du problème direct

Le problème direct peut être résolu soit par des méthodes analytiques (représentation intégrale, méthodes modales,...) soit par des méthodes numériques. Parmi les méthodes numériques les plus usitées figurent : les méthodes de différences finies (Virieux, 1986, à l'ordre 2 et Levander, 1988, à l'ordre 4), les méthodes des éléments finis (Galerkin discontinu par exemple : Brossier, 2009) ou volumes finis (Brossier et al., 2008), les lanciers de rayons (Virieux, 1996).

1.4.2 Résolution du problème inverse

Si le problème direct possède une solution unique, ce n'est pas le cas du problème inverse. Lorsque le nombre de paramètres est grand, le problème inverse ne peut pas être résolu par une recherche exhaustive dans l'espace des solutions. La recherche de solution peut donc se faire de manière semi-globale ou locale.

Les méthodes semi-globales

Les méthodes semi-globales consiste à parcourir l'espace des solutions avec une approche statistiques. Les plus connues sont les améliorations de celle de Monte Carlo comme le recuit simulé (Tarantola, 2005; Sen and Stoffa, 1995) ou la méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov (Zhang et al., 2012), ainsi que les algorithmes génétiques. Elles permettent d'assurer une convergence avec peu d'*a priori* sur le modèle initial.

Les méthodes locales

Lorsque que le modèle initial comporte suffisamment d'informations pour que le problème se situe proche du minimum global recherché, des méthodes d'optimisation moins coûteuses sont envisageables. Ces méthodes se basent sur l'estimation du gradient et du hessien de la fonction coût pour estimer sa plus forte pente et sa courbure.

La méthode du gradient conjugué permet de déterminer le pas de descente optimal, en linéarisant le problème inverse. Cette méthode populaire est celle utilisée par Mora et Tarantola dans les années 80 (Tarantola, 1984; Mora, 1987a,b). Le hessien n'est pas calculé, mais cette méthode nécessite le calcul de deux problèmes directs supplémentaires.

Les méthodes full-Newton et Gauss-Newton utilisent le calcul du hessien (complet pour la première, approximé pour la seconde), ce qui permet une convergence plus rapide qu'avec la méthode du gradient conjugué, sans coût excessif supplémentaire (Pratt et al., 1998).

Enfin, le hessien peut également être calculé à partir des gradients des itérations précédentes, par la méthode quasi-Newton (Nocedal, 1980), avec l'algorithme BFGS (Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno), par exemple. Cet algorithme ayant un gros coût de stockage, une version allégée qui ne stocke que quelques itérations (L-BFGS) est utilisée par Brosier et al. (2009). Ils montrent que cette méthode est plus performante que la méthode du gradient conjugué préconditionné en terme de convergence.

1.4.3 Cartographie ou contour

Comme le souligne les auteurs du chapitre 1.4 de BruneauPotel, le problème inverse peut être résolu suivant deux approches :

- un formalisme en intégrales de contour où les paramètres reconstruits sont ceux décrivant ces contours. Cela revient donc à déterminer la topologie d'un milieu. Le gradient, donné par la dérivée de la fonction coût par rapport à la topologie, indique donc directement la position d'un défaut à fort contraste. Dominguez et al. (2005) et Rodriguez et al. (2013) utilisent par exemple cette approche pour des applications en contrôle non destructif.
- une reconstruction pixelisées d'un ensemble de paramètres. C'est l'approche adoptée pour la FWI et qui est décrite au chapitre ??.

1.5 Spécificités de l'imagerie de soudure

Nombre de ces méthodes sont peu adaptées à l'imagerie de soudure. En effet, comme le montrent les macrographies de la figure 1.3, les passes multiples et la cristallisation inhomogène rendent la soudure fortement anisotrope (Chassignole, 1999). Cette anisotropie varie d'une soudure à une autre puisqu'elle dépend des paramètres de soudage. En conséquence, cette anisotropie engendre une courbure voire une division du faisceau ultrasonore. Les scans sont alors difficiles à analyser (cf figure 1.4), les méthodes par retard et sommation ne permettent pas de relocaliser précisément un réflecteur et les images obtenues sont très sujettes aux artefacts provenant d'échos mal interprétés.

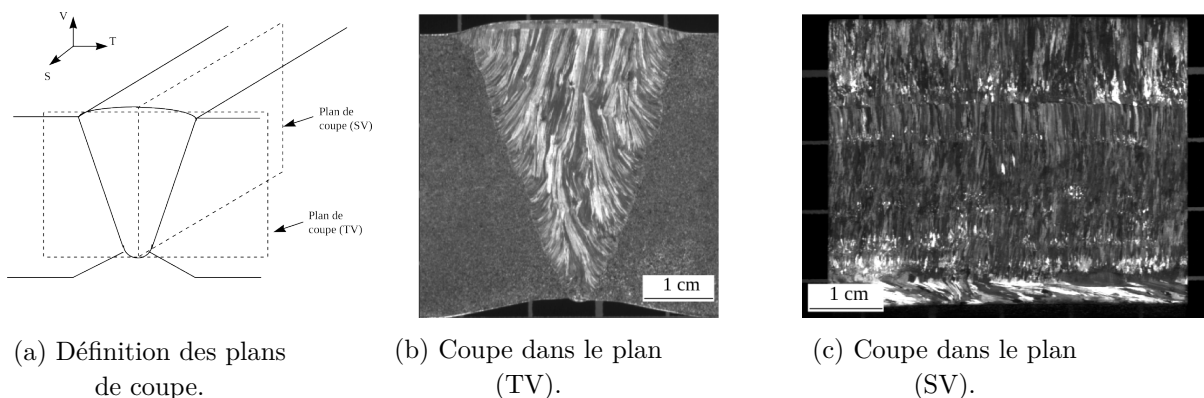


FIGURE 1.3 – Macrographie d'une soudure industrielle en acier inoxydable en acier austénitique (Chassignole, 1999). À gauche : coupe dans le plan (x, z) , à droite : coupe dans le plan (x, y) .

préciser les plans sur un schéma et l'orientation des photos

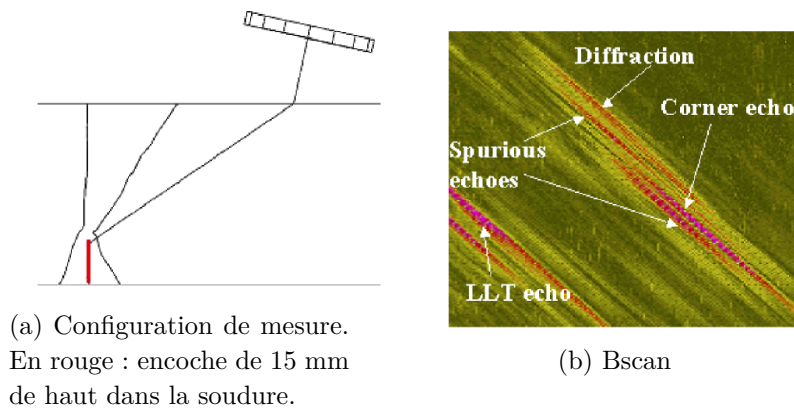


FIGURE 1.4 – Illustration de la perturbation du faisceau ultrasonore dans une soudure. Images extraites de [Chassignole et al. \(2009\)](#). LLT echo : Réflexion de l'onde longitudinale (L) sur le bord de soudure puis réflexion de cette onde L sur l'encoche avec conversion de en mode transverse (T).

champ pas assez diffus pour bénéficier des qualités du retournement temporel.

hohne_2012 pour images SAFT

gardahaut pour propagation de rai CIVA

Born : linéarise le pb? (pour faible contraste, adapté au cnd?) brossier these dit que c'est pas linéarisé et qu'on a donc le champ d'onde complet

+acoustique non-linéaire : Nonlinear signal processing for ultrasonic imaging of material complexity (dos santos) par ex

Bibliographie

- S Bannouf. *Développement et optimisation de méthodes d'imagerie synthétique pour le contrôle non-destructif par ultrasons de composants industriels complexes*. PhD thesis, Univeristé Paris Diderot Paris 7, 2013.
- R. Brossier. *Imagerie sismique à deux dimensions des milieux visco-élastiques par inversion des formes d'ondes : développements méethodologiques et applications*. PhD thesis, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2009.
- R. Brossier, J. Virieux, and S. Operto. Parsimonious finite-volume frequency-domain method for 2-D P-SV-wave modelling. *Geophys. J. Int.*, 175 : p. 541–559, 2008.
- R. Brossier, S. Operto, and J. Virieux. Seismic imaging of complex onshore structures by 2D elastic frequency-domain full-waveform inversion. *Geophysics*, 74(6) : p. WCC105, 2009.
- J. Capon. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57(8) : p. 1408–1418, 1969.
- B. Chassignole. *Influence de la structure métallurgique des soudures en acier inoxydable austénitique sur le contrôle non-destructif par ultrasons*. PhD thesis, INSA Lyon, 1999.
- B. Chassignole, O. Dupond, L. Doudet, V. Duwig, and N. Etchegaray. Ultrasonic examination of an austenitic weld : Illustration of the disturbances of the ultrasonic beam. *AIP Conference Proceedings*, 1096(1), 2009.
- S.R. Doctor, T.E. Hall, and L.D. Reid. SAFT - the evolution of a signal processing technology for ultrasonic testing. *NDT International*, (19) : p. 163–167, 1986.
- N. Dominguez, V. Gibiat, and Y. Esquerre. Time domain topological gradient and time reversal analogy : an inverse method for ultrasonic target detection. *Wave Motion*, 42 : p. 31–52, 2005.
- C Holmes, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation. *NDT&E International*, (38) :701–711, 2005.
- A. R. Levander. Fourth-order finite-difference P-SV seismograms. *Geophysics*, 53(11) : p. 1425–1436, 1988.
- P. Mora. Nonlinear two-dimensional elastic inversion of multioffset seismic data. *Geophysics*, 52(9) : p. 1211–1228, 1987a.

- P. Mora. Nonlinear elastic inversion of real data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, pages 430–432, 1987b.
- J. Nocedal. Updating quasi-newton matrices with limited storage. *Mathematics of computation*, 35(151) : p. 773–782, 1980.
- C Prada, E Kerbrat, D Cassereau, and M Fink. Time reversal techniques in ultrasonic nondestructive testing of scattering media. *Inverse Problems*, 18(6) : p. 1761–1773, 2002.
- R. G. Pratt, C. Shin, and G. J. Hicks. Gauss-newton and full newton methods in frequency-space seismic waveform inversion. *Geophys. J. Int.*, 133 : p. 341–362, 1998.
- S. Rodriguez, M. Deschamps, M. Castaings, and E. Ducasse. Guided wave topological imaging of isotropic plates. *Ultrasonics*, 54 : p. 1880–1890, 2013.
- R. O. Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, AP-34(3) : p. 276–280, 1986.
- M. K. Sen and P.L. Stoffa. *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*. Elsevier, 1995.
- A. Tarantola. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. *Geophysics*, 49(8) : p. 1259–1266, 1984.
- A Tarantola. *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005. ISBN 0898715725.
- J. Virieux. P-SV wave propagation in heterogeneous media, velocity-stress finite difference method. *Geophysics*, 51(4) : p. 889–901, 1986.
- J. Virieux. *Seismic modelling of earth structure*. Editrice compositori, 1996.
- J. Zhang, A. Hunter, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox. Monte Carlo inversion of ultrasonic array data to map anisotropic weld properties. *IEEE*, 59(11) : p. 2487–2497, 2012.