

UNIVERSITÉ DU MAINE  
UFR SCIENCES ET TECHNIQUES  
MASTER ACOUSTIQUE 2<sup>ÈME</sup> 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

1 L'objectif de ce chapitre est de présenter les principales méthodes multi-éléments uti-  
2 lisées pour l'imagerie ultrasonore.

3  
4 Les transducteurs multi-éléments sont d'abord utilisés dans les années 70 pour l'ima-  
5 gerie médicale et sont aujourd'hui largement utilisés en contrôle de pièces industriels. Les  
6 éléments étant pilotables indépendamment, il est possible de leur appliquer une loi de  
7 retard permettant d'orienter le front d'onde ou de focaliser le faisceau excitateur. Cela  
8 permet notamment d'améliorer le rapport signal sur bruit et peut représenter un gain  
9 de temps car le balayage d'une pièce à inspecter peut être réalisé sans déplacement du  
10 transducteur.

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

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

### 16 1.1 Représentation des données temporelles

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

23  
24 Ce type d'analyse peut être réalisé avec des transducteurs mono-éléments. L'obtention  
25 d'une image 2D nécessite alors un balayage sur l'ensemble d'une surface de la pièce à  
26 contrôler.

27 En revanche, le Sscan ne peut être réalisé qu'avec des transducteurs multi-éléments.  
28 Il correspond à un ensemble de Ascans réalisés sans déplacement du transducteur mais  
29 en appliquant une loi de retard aux éléments permettant de réaliser un balayage du point  
30 focal. Le Sscan permet donc d'imager des pièces partiellement accessibles, et augmente la

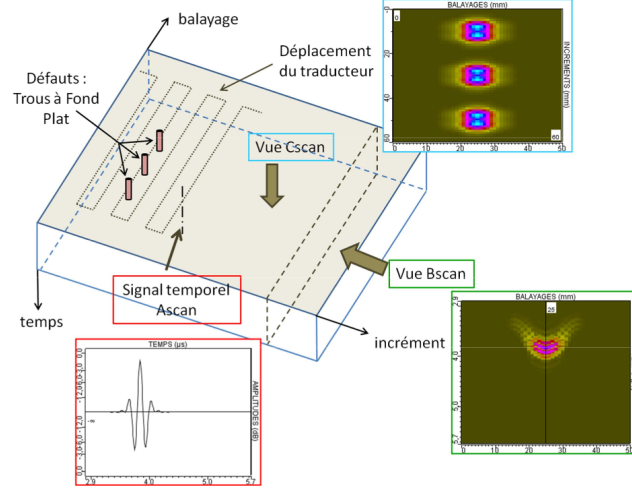


FIGURE 1.1 – Schéma des différents modes de représentation des signaux temporels (extrait de Bannouf (2013)).

31 probabilité de repérer un défaut en offrant plusieurs angles d'observation.

32

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

## 37 1.2 Méthodes par retard et sommation

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

41

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

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

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

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

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

55

### 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.

### 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 ??).

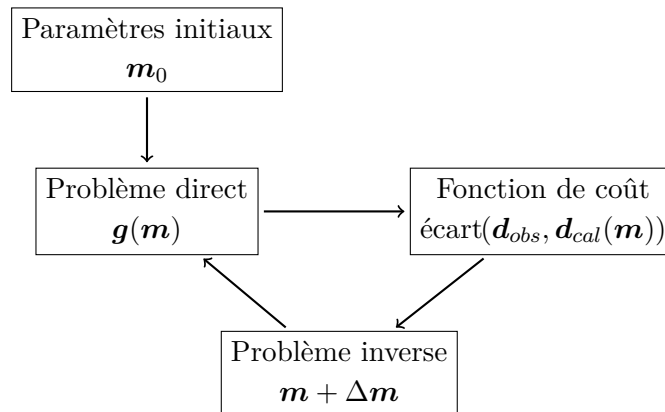


FIGURE 1.2 – Schéma de résolution d'un problème d'optimisation.

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

### 83 1.4.1 Résolution du problème direct

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

### 90 1.4.2 Résolution du problème inverse

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

### 96 Les méthodes semi-globales

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

### 103 Les méthodes locales

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

108  
109 La méthode de recherche linéaire la plus simple est celle du gradient (ou algorithme  
110 de la plus forte pente), qui permet d'effectuer au point courant, un pas de descente dans  
111 la direction opposée au gradient. Les directions de descentes successives sont alors ortho-  
112 gonaux, ce qui ne permet pas une convergence très rapide.

113 La méthode du gradient conjugué propose de combiner les directions de descente des ité-  
114 rations précédentes de façon à accélérer la convergence. Cette méthode populaire est celle  
115 utilisée par Mora et Tarantola dans les années 80 (Tarantola, 1984; Mora, 1987a,b). Le  
116 hessien n'est pas calculé, mais cette méthode nécessite le calcul de deux problèmes directs  
117 supplémentaires.

118  
119 Les méthodes full-Newton et Gauss-Newton utilisent le calcul du hessien (complet  
120 pour la première, approximé pour la seconde), ce qui permet une convergence plus rapide  
121 qu'avec la méthode du gradient conjugué, sans coût excessif supplémentaire (Pratt et al.,  
122 1998).

Enfin, le hessien peut également être estimé 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, il existe des versions allégées fournissant une estimation du hessien à partir du stockage de quelques itérations seulement (L-BFGS).

### 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. Cette approche permet par exemple d'imager des défauts liés à une absence de matière (porosité, fissure, délaminage, ...) mais ne permet pas de caractériser des défauts de contraste plus faible (inclusion, corps étranger, ...).
- une reconstruction pixelisée d'un ensemble de paramètres. C'est l'approche adoptée pour la FWI et qui est décrite au chapitre 1.

## 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 ??, 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 ??), 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.

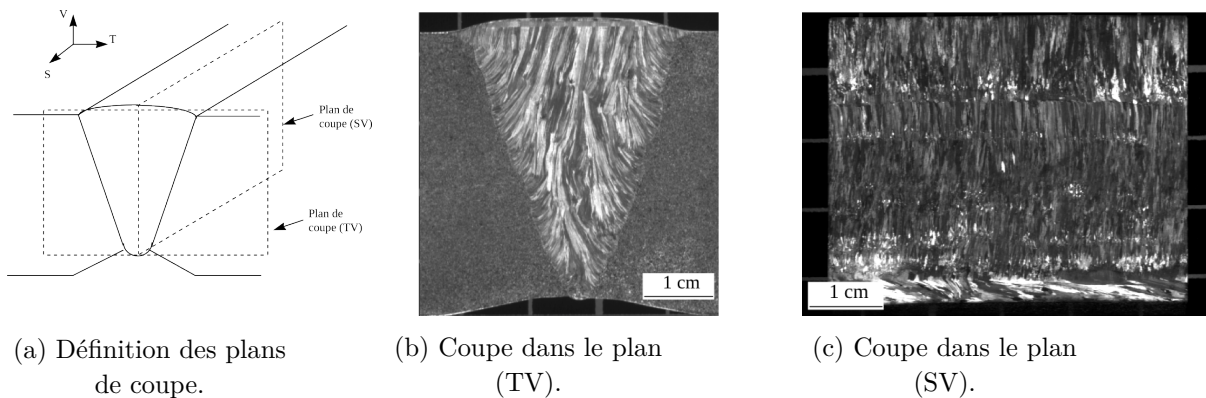
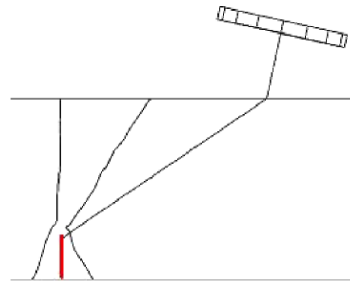
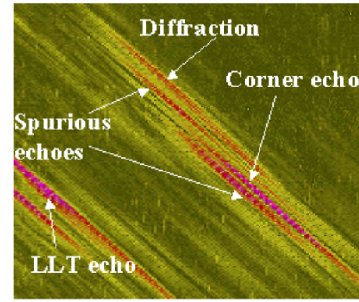


FIGURE 1.3 – Macrographie d'une soudure industrielle en acier inoxydable en acier austénitique (Chassignole, 1999). À gauche : coupe dans le plan  $(x, z)$ , à droite : coupe dans le plan  $(x, y)$ .



(a) Configuration de mesure.  
En rouge : encoche de 15 mm  
de haut dans la soudure.



(b) Bscan

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 en mode transverse (T).

151 De manière générale, les méthodes nécessitant une bonne connaissance du matériau  
152 ne sont pas adaptées à l'imagerie de soudure ; tenter de reconstruire les paramètres élas-  
153 tiques de la soudure par une résolution de problème inverse semble être une approche plus  
154 appropriée.

155

# 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.



- 187 P. Mora. Nonlinear elastic inversion of real data. *SEG Technical Program Expanded*  
188 *Abstracts*, pages 430–432, 1987b.
- 189 J. Nocedal. Updating quasi-newton matrices with limited storage. *Mathematics of com-*  
190 *putation*, 35(151) : p. 773–782, 1980.
- 191 C Prada, E Kerbrat, D Cassereau, and M Fink. Time reversal techniques in ultrasonic  
192 nondestructive testing of scattering media. *Inverse Problems*, 18(6) : p. 1761–1773, 2002.
- 193 R. G. Pratt, C. Shin, and G. J. Hicks. Gauss-newton and full newton methods in frequency-  
194 space seismic waveform inversion. *Geophys. J. Int.*, 133 : p. 341–362, 1998.
- 195 S. Rodriguez, M. Deschamps, M. Castaings, and E. Ducasse. Guided wave topological  
196 imaging of isotropic plates. *Ultrasonics*, 54 : p. 1880–1890, 2013.
- 197 R. O. Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Tran-*  
198 *sactions on antennas and propagation*, AP-34(3) : p. 276–280, 1986.
- 199 M. K. Sen and P.L. Stoffa. *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*. Elsevier,  
200 1995.
- 201 A. Tarantola. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. *Geophy-*  
202 *sics*, 49(8) : p. 1259–1266, 1984.
- 203 A Tarantola. *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*.  
204 Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005. ISBN 0898715725.
- 205 J. Virieux. P-SV wave propagation in heterogeneous media, velocity-stress finite difference  
206 method. *Geophysics*, 51(4) : p. 889–901, 1986.
- 207 J. Virieux. *Seismic modelling of earth structure*. Editrice compositori, 1996.
- 208 J. Zhang, A. Hunter, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox. Monte Carlo inversion of  
209 ultrasonic array data to map anisotropic weld properties. *IEEE*, 59(11) : p. 2487–2497,  
210 2012.