

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

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
21 une coupe transversale de la pièce, sur un plan de balayage (Cscan et Dscan) donnant
22 une vue de surface et ne permettant pas une localisation en profondeur d'un réflecteur (cf
23 figure 1.1).

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

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

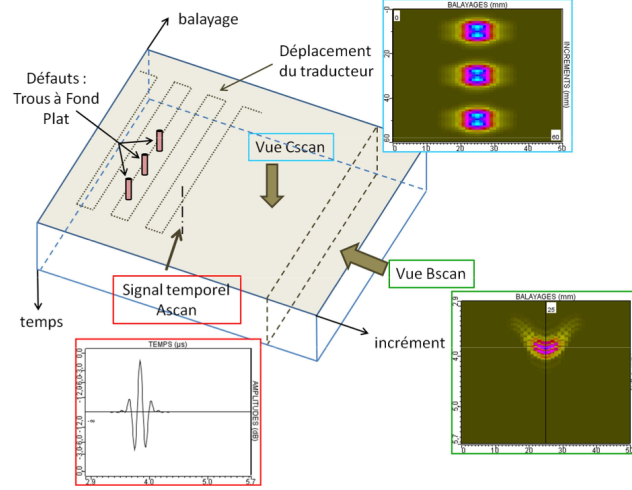


FIGURE 1.1 – Schéma des différents modes de représentation des signaux temporels (extrait de Bannouf (2013)).

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

33

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

38 1.2 Méthodes par retard et sommation

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

42

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

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

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

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

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

56

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 (?) 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 1.2).

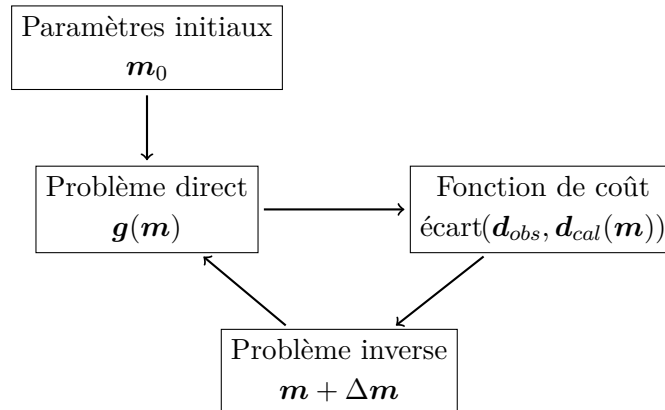


FIGURE 1.2 – Schéma de résolution d'un problème d'optimisation.

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.

84 1.4.1 Résolution du problème direct

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

91 1.4.2 Résolution du problème inverse

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

97 Les méthodes semi-globales

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

104 Les méthodes locales

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

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

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

119
120 Les méthodes full-Newton et Gauss-Newton utilisent le calcul du hessien (complet
121 pour la première, approximé pour la seconde), ce qui permet une convergence plus rapide
122 qu'avec la méthode du gradient conjugué, sans coût excessif supplémentaire (Pratt et al.,
123 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 2.

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.

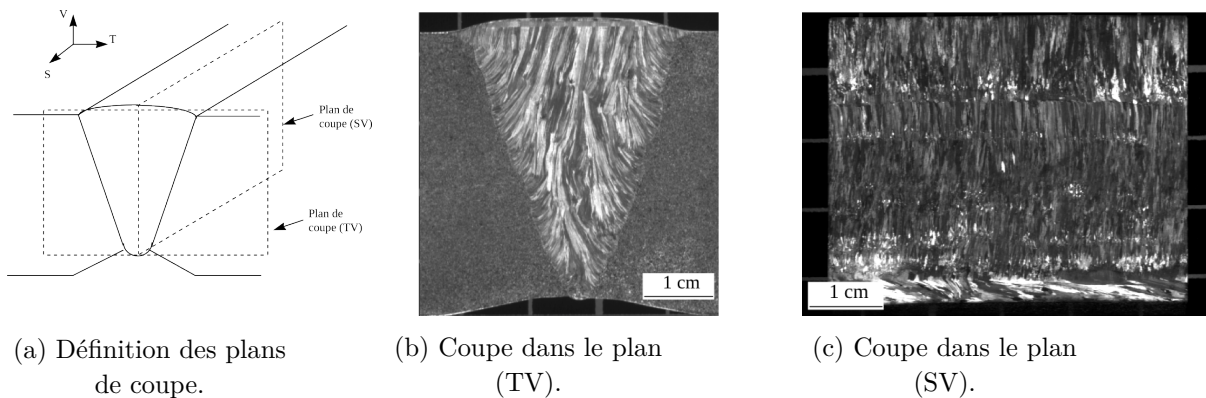
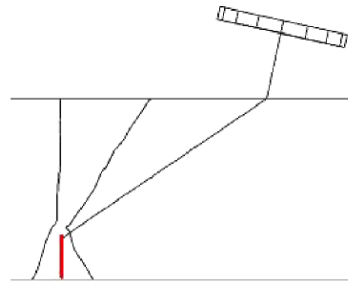
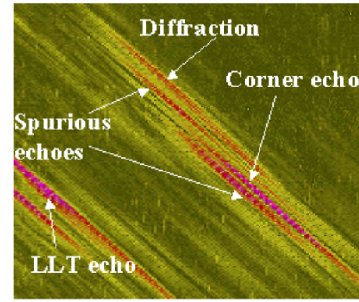


FIGURE 1.3 – Macrographie d'une soudure industrielle en acier inoxydable en acier austénitique (Chassignole, 1999). À gauche : coupe dans le plan (x, z) , à droite : coupe dans le plan (x, y) .



(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).

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

157

Chapitre 2

158

L'inversion de formes d'onde

159

160

161

162

163

164

L'inversion de forme d'ondes (ou FWI, pour *Full Waveform Inversion*) est une méthode quantitative d'imagerie développée dans un contexte géophysique permettant de reconstruire des paramètres élastiques par résolution d'un problème inverse posé dans les années 80 par ? et [Tarantola \(1984\)](#). Par opposition à des inversions du type tomographie qui n'utilisent que partiellement les informations contenues dans les champs mesurés, l'inversion de formes d'onde utilise l'ensemble des données sans hypothèses.

165

166

167

168

169

Le principe général est de calculer des données \mathbf{d}_{cal} issues d'un modèle (résolution du problème direct) puis de minimiser l'écart entre ces données et les données réelles \mathbf{d}_{obs} issues de la mesure en modifiant les paramètres du modèle (?). Cette démarche est résumée en figure 2.1 et l'ensemble des étapes est détaillé par la suite.

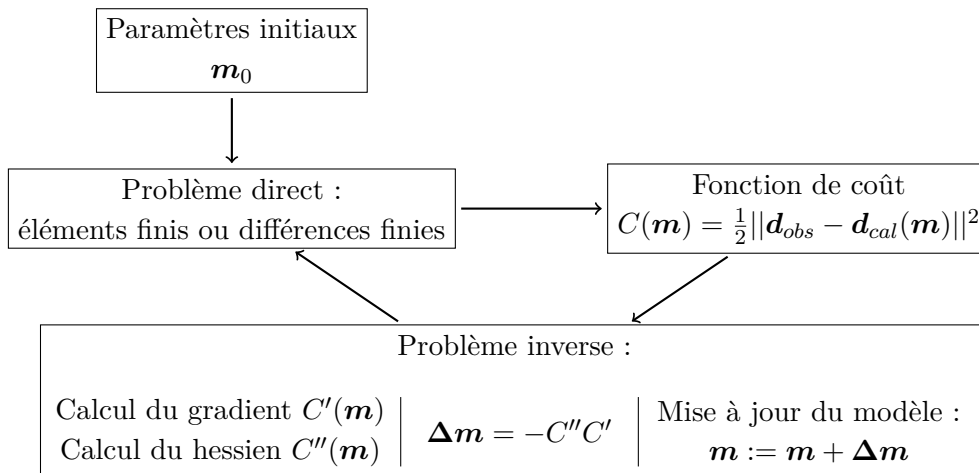


FIGURE 2.1 – Schéma du principe de la FWI.

170

2.1 Problème direct

171

172

173

174

175

Dans le cas de l'imagerie par ultrason, résoudre le problème direct revient à trouver la solution de l'équation d'onde linéarisée. Il est fréquent que l'hypothèse d'une propagation acoustique soit faite en prospection géophysique. Cette approximation a pour but de réduire fortement le coût des calculs et est justifiée par le fait que la trace des ondes de compression soit dominante dans les données de mesures. De plus, en réduisant le nombre

de paramètres du modèle, le problème est rendu moins non-linéaire. Cependant, cette approximation ne permet pas une caractérisation complète du milieu et, pour une application en CND, demande un pré-traitement précis des données et retire notamment la précision qu'offrent les ondes de cisaillement par leur faible longueur d'onde.

Le problème peut-être résolu dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel (?). Le domaine temporel laisse la possibilité d'effectuer une sélection des arrivées d'ondes par fenêtrage temporel mais présente une plus forte susceptibilité au phénomène de saut de phase (décrit dans le paragraphe ???).

Pour résoudre l'équation d'onde, parmi les approches qui nécessitent de faire le moins d'hypothèse sur le champ d'onde et sur le milieu de propagation figurent les différences finies et les éléments finis. Les différences finies sont les plus faciles à "écrire" et à implémenter. Elles permettent de discrétiser les dérivées temporelles et spatiales par des différences d'ordre 2 (Virieux, 1986) ou d'ordre 4 (Levander, 1988). Cependant, contrairement aux éléments finis, elles imposent l'utilisation de grilles régulières et ne permettent donc pas d'adapter localement le pas de grille à la géométrie ou à la complexité du milieu. Les éléments finis se prêtent mieux aux maillages non-structurés. Leur solution est développée sur des basent de fonction (d'ordre élevé pour les éléments finis spectraux) et permettent de prendre simplement en compte les conditions limites.

Deux types de conditions limites sont nécessaires pour le modèle de soudure à 2 dimensions (2D) : une condition parfaitement réfléchissante (Dirichlet) au niveau des surfaces de la plaque (en considérant une mesure dans l'air, le couplage fluide structure est négligeable) et une condition absorbante pour représenter la plaque loin de la zone d'étude (cf figure 2.2). Les conditions absorbantes sont modélisées à l'aide de *Perfectly Matched Layers* (PML) qui simulent une forte atténuation dans une zone restreinte de manière anisotrope (seule la composante normale de l'onde est atténuée).

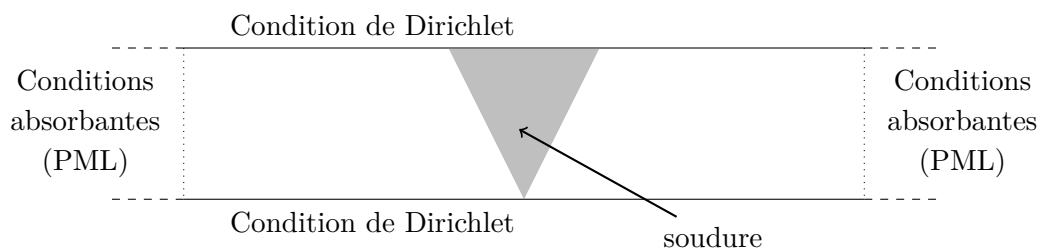


FIGURE 2.2 – Représentation des deux types de conditions limites du modèle de soudure 2D.

Questions : qu'est-ce qui est fait en fréquence, qu'est qui est fait en temps ?

Dans le domaine fréquentiel, l'équation d'onde étant réduite à un système d'équations linéaires, il est possible d'utiliser des méthodes de résolution directe du type décomposition LU bien qu'en pratique, les performances de ces méthodes soient limitées pour des problèmes comportant un grand nombre d'inconnues. Les principaux avantages d'une résolution du problème direct dans le domaine fréquentiel sont donc d'intégrer facilement les phénomènes d'atténuation et de permettre une sélection fine des fréquences d'intérêt.

212 Cependant, la résolution par différences finies dans le domaine temporel impose un critère
213 de stabilité Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) qui peut-être contraignant, surtout en 3D.

214 2.2 Problème inverse

215 Le problème inverse est un problème d'optimisation locale visant à réduire l'écart
216 entre les données observées \mathbf{d}_{obs} et les données calculées $\mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})$ pour chaque couple
217 source-récepteur, en ajustant le modèle constitué de M paramètres \mathbf{m} . L'idée est donc de
218 minimiser la norme au sens des moindres carrés de la différence $\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})$ définie
219 comme suit :

$$C(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})\|^2. \quad (2.1)$$

220 Le minimum de cette fonction de coût est atteint lorsque la dérivée par rapport aux
221 paramètres du modèle s'annule. Un développement de Taylor au second ordre de $C(\mathbf{m} +$
222 $\Delta\mathbf{m})$ permet d'écrire :

$$\frac{\partial C(\mathbf{m} + \Delta\mathbf{m})}{\partial m_i} = \frac{\partial C(\mathbf{m})}{\partial m_i} + \sum_j^M \frac{\partial^2 C(\mathbf{m})}{\partial m_j \partial m_i} \Delta m_j. \quad (2.2)$$

223 Les termes d'ordres plus élevés sont nuls si le problème direct est linéaire. Le minimum de
224 la fonction de coût est alors atteint en une seule itération en annulant la dérivée :

$$\frac{\partial C(\mathbf{m} + \Delta\mathbf{m})}{\partial m_i} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \Delta m_j = - \left(\frac{\partial^2 C(\mathbf{m})}{\partial m_j \partial m_i} \right)^{-1} \frac{\partial C(\mathbf{m})}{\partial m_i}. \quad (2.3)$$

225 En FWI, le problème inverse n'étant pas linéaire, cette inversion est réalisée sur plusieurs
226 itérations.

227 La direction de descente est donc donnée par le gradient et la dérivée seconde (hessien)
228 donne la courbure de la fonction de coût.

229

230 Une des difficultés de l'inversion réside donc dans le calcul du hessien. La méthode
231 présentant le plus de qualité en terme de convergence et de temps de calcul est la méthode
232 de Gauss-Newton qui propose d'utiliser une version approximée de l'inverse du hessien,
233 calculée à partir de valeurs précédentes du gradient.

234 2.2.1 Calcul du gradient

235 D'après l'expression de la norme 2.1, sa dérivée par rapport aux paramètres \mathbf{m} (le
236 gradient) est donc :

$$\frac{\partial C(\mathbf{m})}{\partial m_i} = - \left(\frac{\partial \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})}{\partial m_i} \right)^t |\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})|. \quad (2.4)$$

237

238

239 Le problème direct décrit au paragraphe précédent (2.1) peut se mettre sous la forme :

$$\mathbf{A}(\mathbf{m}, \mathbf{r}, \xi) \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}, \mathbf{r}, \xi) = \mathbf{s}(\mathbf{r}, \xi), \quad (2.5)$$

240 où \mathbf{r} est la variable d'espace et ξ est le temps ou la fréquence. \mathbf{A} est un opérateur
241 correspondant à l'équation d'onde et \mathbf{s} est le terme source. Notons que le vecteur de

développer ?

données \mathbf{d}_{cal} a une longueur égale au nombre de récepteur et doit donc être étendu de façon
a avoir la même longueur que l'espace du problème direct. La dérivée de l'équation 2.5
par rapport à \mathbf{m} s'écrit :

$$\mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})}{\partial m_i} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}) = \mathbf{0}. \quad (2.6)$$

On a donc :

$${}^t \left(\frac{\partial \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}} \right) = - {}^t \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}) \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{m}} \right) {}^t \mathbf{A}^{-1} \quad (2.7)$$

Finalement, en reportant cette expression dans l'équation 2.4, on obtient l'expression
du gradient :

$$\frac{\partial C(\mathbf{m})}{\partial m_i} = {}^t \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}) \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) {}^t \mathbf{A} |\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})|^* = {}^t \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}) \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \lambda^* \quad (2.8)$$

conjugué de Δd ?

Le champ λ^* correspond donc à la rétropropagation des résidus $|\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})|^*$. L'opé-
rateur conjugué $*$ indique une propagation en temps inverse, ce qui permet, comme en
retournement temporel (Prada et al., 2002), une focalisation sur les éléments diffractant
absents du modèle initial.

La substitution 2.7 permet donc d'éviter le calcul de la matrice de sensibilité ${}^t \left(\frac{\partial \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})}{\partial m_i} \right)$
. Le calcul du gradient découle donc du calcul de deux problèmes directs :

$$\mathbf{A}(\mathbf{m}) \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}) = \mathbf{s} \quad \text{et} \quad \mathbf{A}(\mathbf{m}) \lambda^*(\mathbf{m}) = |\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})|^*$$

2.3 Optimisation

brossier these : explication du choix de la norme l2

Algo choisi pour le quasi-newton : 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 algo-
rithme ayant un gros coût de stockage, une version allégée qui ne stocke que quelques
itérations (L-BFGS) est utilisée par Brossier et al. (2009). Ils montrent que cette méthode
est plus performante que la méthode du gradient conjugué préconditionné en terme de
convergence.

regularisation : limiter les artefacts haute-fréquence : pondération compliquée (cf bro-
sier thèse) ou opérateur de lissage appliqué à $\Delta \mathbf{m}$ sous forme de filtre spatial adapté à la
longueur d'onde correspondant à la fréquence d'inversion.

2.4 problématiques

2.4.1 choix du modèle initial

2.4.2 saut de phase

taille de l'offset, longueur des données temporelles

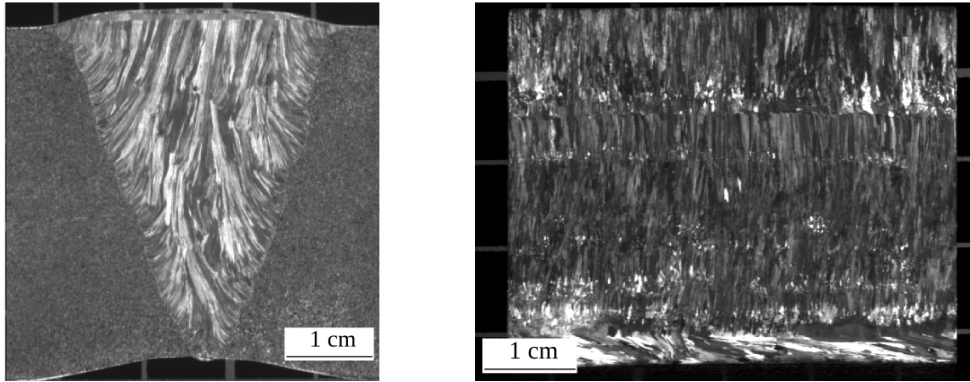


FIGURE 2.3 – Macrographie d’une soudure industrielle en acier inoxydable en acier austénitique (Chassignole, 1999). À gauche : coupe dans le plan (x, z) , à droite : coupe dans le plan (x, y) .

2.4.3 inversion multi-paramètres

2.4.4 estimation de la source

2.5 resultats en geophy

...et aussi appliqué en médical et à des ondes électromagnétiques, rayon X : natterer ?

2.6 application au cnd de soudure : les problématiques

-guide d’onde -acquisition en surface seulement, et problématique de la soudure bombée -anisotropie (cf image soudure) forte, qui touche not. les ondes S. -acquisition horizontale pas idéale pour inverser la vitesse horizontale (car petits offsets et peu de courbure de rayon comme en géophys) (discuter le choix des paramètres à inverser compte-tenu de la configuration) -sources et récepteurs mobiles -geophysique, dispositif de surface, donc on ne considère que les diffractions rayonnant vers la surface (soit angle de diffraction de max 180°) (Forgues, pages 160). En CND, on illumine des deux côté

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

grains colonnaires

p91 potel bruneau : données "d’aspect limité" : il n’es t pas possible de tourner autour de l’obstacle. On colpense la perte d’info en réalisant les mesures sur plusieurs freq et possibilité de déplacer capteur.

2.6.1 sensibilité au bruit ?

Les impasses volontairement faites :

- détail de la discrétisation différences finies / détail des calculs FEM

291 Chapitre 3

292 Annexes

293 3.1 Note sur les dimensions des grandeurs du chapitre 2

294 Les matrice A , qui est l'opérateur de l'équation d'onde a les dimensions de l'espace
295 du problème direct : $l \times l$, où $l = n_x \times n_z$, n_x et n_z étant les dimensions du milieu de
296 propagation discrétisé.

297 De la même façon, le champ d'onde \mathbf{u} et le vecteur source \mathbf{s} sont de dimension $l \times 1$.

298 Or, les vecteurs de données \mathbf{d} ne contiennent que les informations aux n points de réception.

299 Ils sont donc de dimension $1 \times n$. Les calculs sont donc menés sur des vecteurs agrandis à
300 l'aide de zéros de façon à ce que \mathbf{d} soit de dimension $l \times 1$.

301 Finalement, le gradient $\frac{\partial C(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}}$ est bien de dimension $M \times 1$ avec M le nombre de paramètre
302 du problème (Pratt et al., 1998).

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.

- 334 P. Mora. Nonlinear elastic inversion of real data. *SEG Technical Program Expanded*
335 *Abstracts*, pages 430–432, 1987b.
- 336 J. Nocedal. Updating quasi-newton matrices with limited storage. *Mathematics of com-*
337 *putation*, 35(151) : p. 773–782, 1980.
- 338 C Prada, E Kerbrat, D Cassereau, and M Fink. Time reversal techniques in ultrasonic
339 nondestructive testing of scattering media. *Inverse Problems*, 18(6) : p. 1761–1773, 2002.
- 340 R. G. Pratt, C. Shin, and G. J. Hicks. Gauss-newton and full newton methods in frequency-
341 space seismic waveform inversion. *Geophys. J. Int.*, 133 : p. 341–362, 1998.
- 342 S. Rodriguez, M. Deschamps, M. Castaings, and E. Ducasse. Guided wave topological
343 imaging of isotropic plates. *Ultrasonics*, 54 : p. 1880–1890, 2013.
- 344 R. O. Schmidt. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Tran-*
345 *sactions on antennas and propagation*, AP-34(3) : p. 276–280, 1986.
- 346 M. K. Sen and P.L. Stoffa. *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*. Elsevier,
347 1995.
- 348 A. Tarantola. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. *Geophy-*
349 *sics*, 49(8) : p. 1259–1266, 1984.
- 350 A Tarantola. *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*.
351 Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005. ISBN 0898715725.
- 352 J. Virieux. P-SV wave propagation in heterogeneous media, velocity-stress finite difference
353 method. *Geophysics*, 51(4) : p. 889–901, 1986.
- 354 J. Virieux. *Seismic modelling of earth structure*. Editrice compositori, 1996.
- 355 J. Zhang, A. Hunter, B. W. Drinkwater, and P. D. Wilcox. Monte Carlo inversion of
356 ultrasonic array data to map anisotropic weld properties. *IEEE*, 59(11) : p. 2487–2497,
357 2012.