

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

L'inversion de formes d'onde

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 Lailly (1983) 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.

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 (Virieux and Operto, 2009). Cette démarche est résumée en figure 1.1 et l'ensemble des étapes est détaillé par la suite.

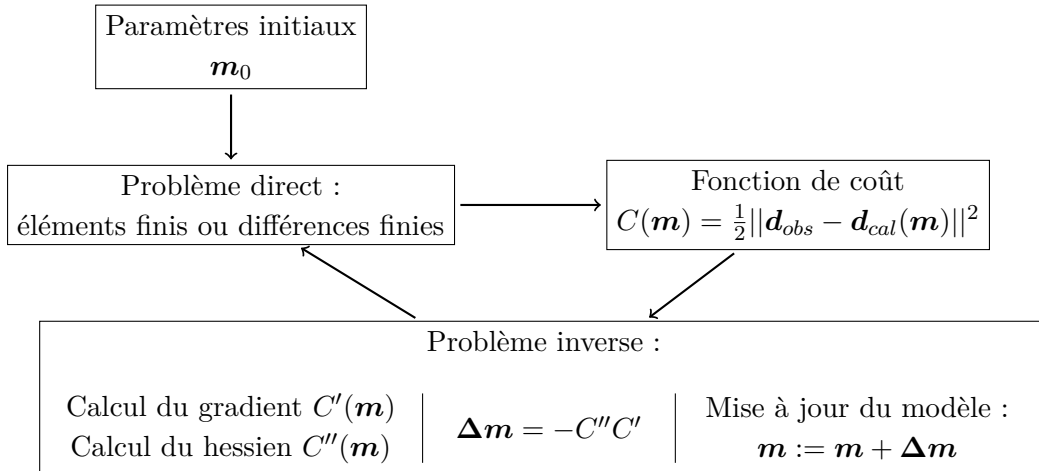


FIGURE 1.1 – Schéma du principe de la FWI.

1.1 Problème direct

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

parcimonieux des données et retire notamment la précision qu'offrent les ondes de cisaillement par leur faible longueur d'onde.

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 développer et à implémenter. Elles permettent de discrétiser les dérivées temporelles et spatiales par des différences d'ordre 2 (Vierieux, 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 1.2). 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).

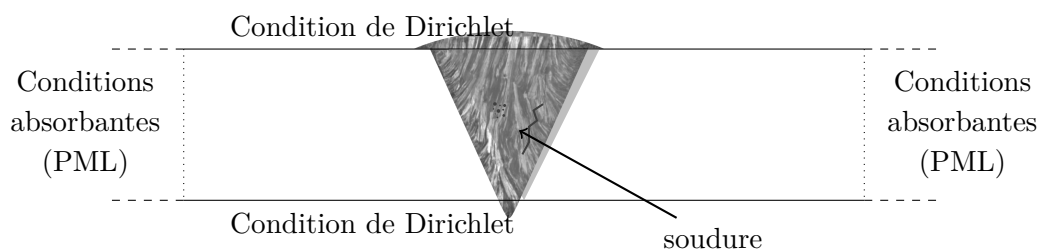


FIGURE 1.2 – Représentation des deux types de conditions limites du modèle de soudure 2D.

Questions : qu'est-ce qui est fait en fréquence, qu'est qui est fait en temps (modèle, inversion) ?

Le problème peut-être résolu dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel (Vigh and Starr, 2008). 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 ???). De plus, la résolution par différences finies dans le domaine temporel impose un critère de stabilité Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) qui peut-être contraignant, surtout en 3D. 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.

1.2 Problème inverse

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

$$C(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})\|^2. \quad (1.1)$$

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

$$\frac{\partial C(\mathbf{m} + \Delta\mathbf{m})}{\partial m_i} = \frac{\partial C(\mathbf{m})}{\partial m_i} + \sum_j^M \frac{\partial^2 C(\mathbf{m})}{\partial m_j \partial m_i} \Delta m_j. \quad (1.2)$$

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

$$\frac{\partial C(\mathbf{m} + \Delta\mathbf{m})}{\partial m_i} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \Delta m_j = - \left(\frac{\partial^2 C(\mathbf{m})}{\partial m_j \partial m_i} \right)^{-1} \frac{\partial C(\mathbf{m})}{\partial m_i}. \quad (1.3)$$

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

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

1.2.1 Calcul du gradient

D'après l'expression de la norme 1.1, sa dérivée par rapport aux paramètres \mathbf{m} (le gradient) est donc :

$$\frac{\partial C(\mathbf{m})}{\partial m_i} = - \left(\frac{\partial \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})}{\partial m_i} \right)^t (\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})). \quad (1.4)$$

Le problème direct décrit au paragraphe précédent (1.1) peut se mettre sous la forme :

$$\mathbf{A}(\mathbf{m}, \mathbf{r}, \xi) \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}, \mathbf{r}, \xi) = \mathbf{s}(\mathbf{r}, \xi), \quad (1.5)$$

où \mathbf{r} est la variable d'espace et ξ est le temps ou la fréquence. \mathbf{A} est un opérateur correspondant à l'équation d'onde et \mathbf{s} est le terme source. Notons que le vecteur de données \mathbf{d}_{cal} a une longueur égale au nombre de récepteur et doit donc être étendu de façon à avoir la même longueur que l'espace du problème direct. La dérivée de l'équation 1.5 par rapport à \mathbf{m} s'écrit :

$$\mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})}{\partial m_i} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}) = \mathbf{0}. \quad (1.6)$$

On a donc :

$$\left(\frac{\partial \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}} \right)^t = - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})^t \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{m}} \right)^t \mathbf{A}^{-1} \quad (1.7)$$

Finalement, en reportant cette expression dans l'équation 1.4, on obtient l'expression du gradient :

$$\frac{\partial C(\mathbf{m})}{\partial m_i} = \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})^t \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right)^t \mathbf{A} (\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}))^* = \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})^t \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right)^t \lambda^* \quad (1.8)$$

Le champ λ^* correspond donc à la rétropropagation des résidus $(\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}))^*$. L'opérateur 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. Cette expression du gradient peut également être obtenue par le formalisme de l'état adjoint (Plessix, 2006).

La substitution 1.7 permet d'éviter le calcul de la matrice de sensibilité $\left(\frac{\partial \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})}{\partial m_i} \right)^t$. Le calcul du gradient découle donc du calcul de deux problèmes directs :

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

1.2.2 Calcul du hessien

La méthode d'optimisation choisie pour la FWI est une méthode quasi-Newton qui propose d'utiliser une version approximée de l'inverse du hessien, calculée à partir de valeurs précédentes du gradient. Brossier et al. (2009) montrent que cette méthode, développée avec l'algorithme L-BFGS, est plus performante que la méthode du gradient conjugué préconditionné en terme de convergence.

1.2.3 Régularisation

Le problème étant mal-posé, il est nécessaire de limiter les artefacts haute-fréquences venant perturber $\Delta \mathbf{m}$. Pour cela, il est possible d'ajouter un terme de pondération à la fonction de coût qui permet de lisser le modèle. Ce lissage peut aussi être directement appliqué à $\Delta \mathbf{m}$ sous forme de filtre spatial adapté à la longueur d'onde correspondant à la fréquence d'inversion.

1.3 Problématiques liées à l'inversion

1.3.1 Choix du modèle initial

Afin d'assurer une convergence vers le minimum global, il est nécessaire que le modèle initial se situe dans le bassin d'attraction de la fonctionnelle. Pour cela, il faut s'assurer que le modèle soit cinématiquement acceptable en levant l'ambiguïté sur la phase. Les données temporelles issues de ce modèle doivent donc avoir un retard de moins d'une demi-longueur d'onde par rapport aux données observées vraies. Si cette condition n'est pas respectée, l'algorithme ne permettra pas un bon réajustement des phases et convergera vers un minimum local (cf 1.3).

À défaut de disposer d'un modèle initial cinématiquement acceptable, il est possible de d'appliquer un ensemble de stratégies permettant de limiter ces artefacts : introduire progressivement les sources ou récepteurs les plus éloignés, rallonger progressivement les temps d'acquisition, et inverser prioritairement les données basses fréquences.

En sismologie, une image issue de tomographie peut fournir un modèle initial assez précis. Dans cette étude, on considère que peu d'informations sont connues sur les paramètres élastiques de la soudure et le modèle initial choisi est uniforme (cf chapitre ??).

1.3.2 Inversion multi-paramètres

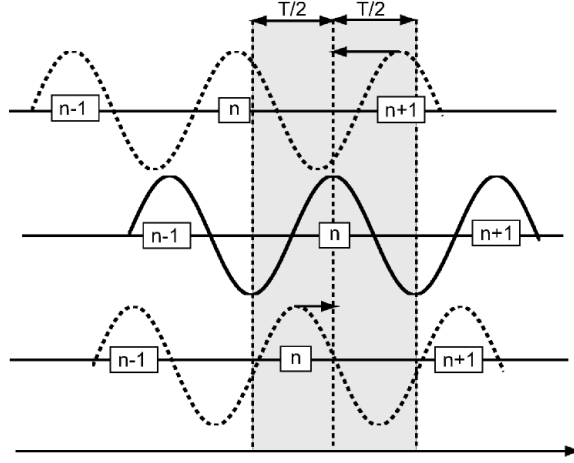


FIGURE 1.3 – Illustration de l’ambiguïté sur la phase (extraite de [Brossier \(2009\)](#)). En haut, le déphasage est supérieur à $T/2$, les arches sont mal ajustées. En bas, le déphasage est inférieur à $T/2$, les phases sont bien ajustées.

L’inversion multi-paramètres implique plus de degrés de liberté dans le problème et rend donc l’inversion plus difficile. De plus, ces paramètres peuvent avoir des effets couplés ou non de différentes natures (cinématique ou dynamique) et de différentes amplitudes sur les données. Il faut donc choisir les paramètres à inverser de manière à ce qu’ils décrivent au mieux (de manière complémentaire) les propriétés du milieu à imager. Par exemple, les paramètres de vitesse influencent le champ en terme de temps de vol, tandis que la densité ou l’impédance jouent davantage sur l’amplitude du champ.

À chaque ensemble de paramètres est associé un diagramme de rayonnement lié à l’expression de leur différentielle ([Forgues, 1996](#)). Ajouté à l’illumination restreinte par le système d’acquisition, ce rayonnement peut filtrer le spectre en nombre d’onde du milieu reconstitué. Quelques exemples de diagrammes de rayonnement sont présentés en figure 1.4, où κ est le module d’incompressibilité, ρ est la densité, v_p est la vitesse des ondes longitudinales se propageant suivant z et I_p est l’impédance, tels que :

$$I_p = \sqrt{\kappa\rho} \quad \text{et} \quad \kappa = \rho v_p.$$

Ces diagrammes correspondent au rayonnement des paramètres acoustiques dans un milieu isotrope. En milieu anisotrope, ces diagrammes sont plus difficiles à estimer analytiquement et nécessite une bonne connaissance de l’anisotropie du milieu.

1.3.3 Estimation de la source

Pour que les données calculées puissent être comparées aux données observées, il est nécessaire que les termes sources à l’origine des deux champs soit semblables. Ce terme source est linéairement lié au champ (cf équation 1.5) et il peut donc être calculé par la résolution d’un problème linéaire ([Pratt, 1999](#)) dont la solution est :

$$s = \frac{{}^t d_{cal}(\mathbf{m})^* d_{obs}^*}{d_{cal}({}^t \mathbf{m})^* d_{cal}(\mathbf{m})^*}.$$

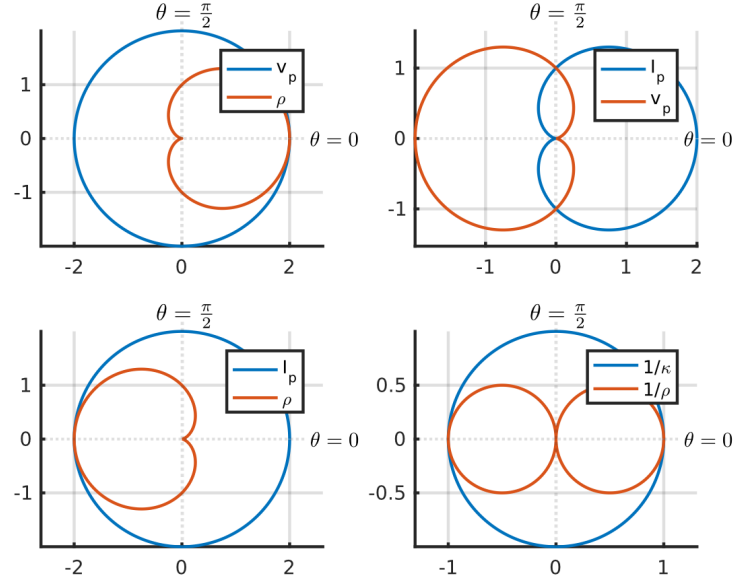


FIGURE 1.4 – Diagrammes de rayonnement pour différentes paramétrisations d'un milieu acoustique (amplitudes relatives) tracés d'après [Forgues \(1996\)](#).

1.4 Exemple d'application en géophysique

Dans cette section, on se propose de présenter un exemple d'application de la FWI à des données sismologiques dans le cadre de la prospection pétrolière. Dans ce domaine, les mesures étant rares et coûteuses, l'exploitation des données doit être efficace en terme de qualité d'image. C'est pourquoi une méthode comme la FWI y est adaptée, bien qu'elle nécessite beaucoup de ressource informatique.

L'exemple choisi est issu d'une acquisition en fond de mer du Nord (Ocean Bottom Cable) par hydrophones, au niveau de Valhall en Norvège. Ce dispositif est constitué de 120 km de câbles équipés de 2414 récepteurs, espacés de 50 m, couvrant 45 km² (cf figure 1.5).

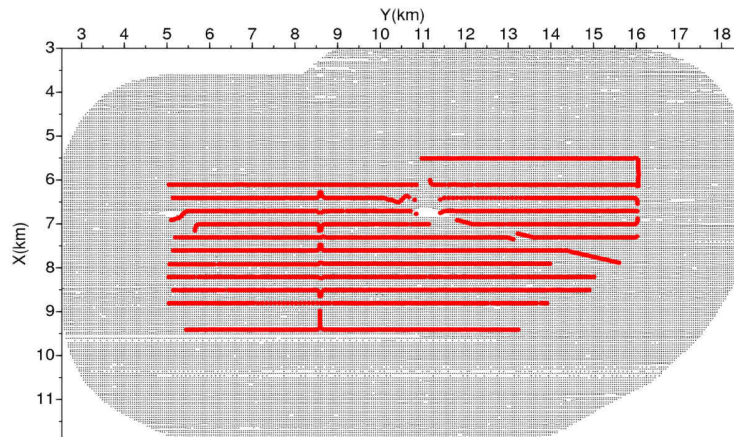


FIGURE 1.5 – Schéma du dispositif d'acquisition pour les mesure sur Valhall. L'antenne de récepteur est représenté en rouge (l'espacement entre les câble est d'environ 300 m) et les positions des sources sont données par les points gris.

Le résultat du post-traitement des données est présenté en figure 1.6. Cette figure confronte les images obtenues par une méthode d'imagerie conventionnelle (tomographie en réflexion) et

celles obtenues par FWI de 3.5 à 7 Hz, avec pour modèle initial la carte de vitesse donnée par tomographie.

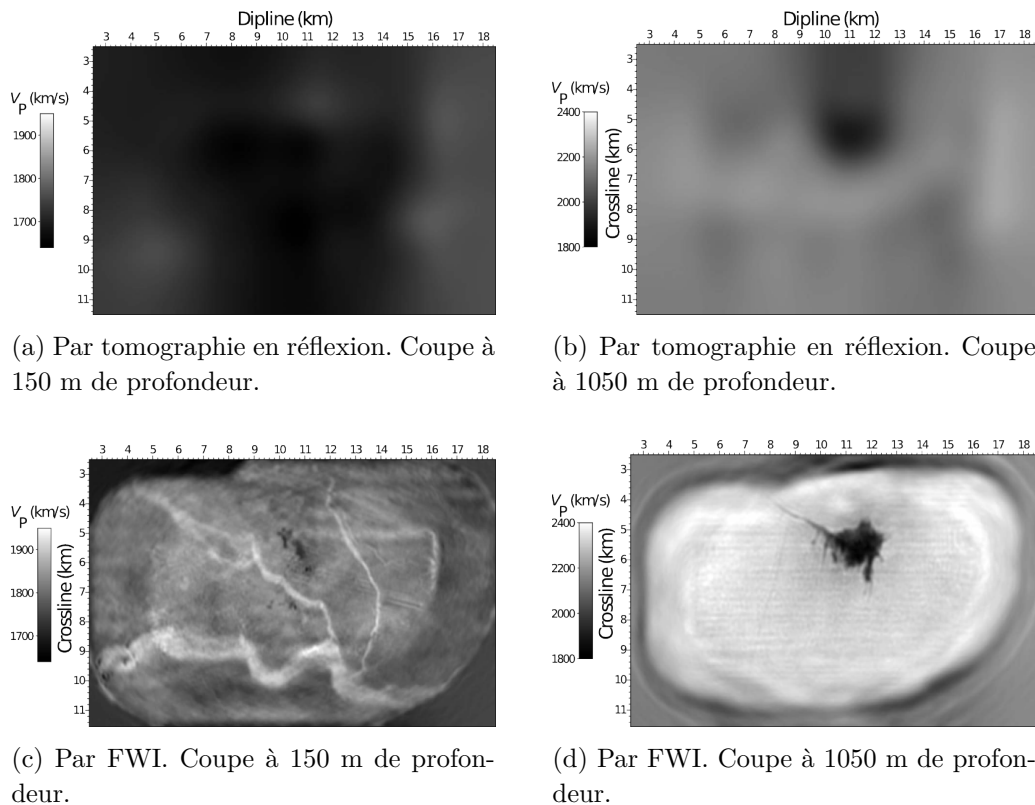


FIGURE 1.6 – Images des vitesses dans le champ de Valhall.

terminologie : field : champ ? / ray-based reflection tomography : tomographie en réflexion ?

quelles types de sources ?

La FWI permet de faire apparaître des galeries à 150 m de profondeur, invisible en tomographie. À 1050 m, les contours du nuage de gaz (en noir) sont également mieux défini par la FWI. Cette méthode d'imagerie eut donc constituer une aide précieuse pour l'analyse des sous-sols et pour la mise en place des stratégies de forage.

On comprend par la qualité d'image qu'offre la FWI qu'il est intéressant de varier ses applications. On peut citer l'utilisation des ondes électromagnétiques (données radar, par exemple ?) ou encore l'imagerie médicale. Dans ce domaine, Oberai et al. (2003, 2004) reconstruit le module d'élasticité en équilibre statique d'une imitation de tissu humain.

1.5 Application au CND de soudure : les problématiques

Les problématiques du CND de soudure par FWI sont liées à quelques nouvelles spécificités, propre à cette application, qui sont :

- la forte anisotropie,
- la forme guide d'onde du milieu qui offres de multiples réflexions,
- le système d'acquisition limité par la géométrie de la pièce (cf figure ??).

Pour des acquisitions de surface en sismologie, seules les diffractions rayonnant vers la surface sont considérées (soit un angle de diffraction n'excédant pas 180°). Dans la cas de l'imagerie de soudure, il n'est pas non plus possible de tourner autour de l'obstacle, mais un éclairage bilatéral est possible, avec déplacement éventuel des transducteurs.

-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

grains colonnaires

p91 potel bruneau : données "d'aspect limité" : il n'es tpas 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.

1.5.1 sensibilité au bruit ?

Les impasses volontairement faites :

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

born approx

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 mééthodologiques 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.
- É Forgues. *Inversion linéarisée multi-paramètres via la théorie des rais (application aux données de sismique réflexion de surface)*. PhD thesis, Institut Fran cais du Pétrole - University Paris VII, 1996.
- 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.
- P. Lailly. The seismic inverse problem as a sequence of before stack migrations. In *Conference on Inverse Scattering–Theory and Application*, pages p. 206–220, 1983.
- 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.
- A. A. Oberai, N. H. Gokhale, and G. R. Feijoo. Solution of inverse problems in elasticity imaging using the adjoint method. *Inverse Problems*, 19 : p. 297–313, 2003.
- A. A. Oberai, N. H. Gokhale, M. M. Dooley, and J. C. Bamber. Evaluation of the adjoint equation based algorithm for elasticity imaging. *Phys. Med. Biol.*, 49 : p. 2955–2974, 2004.
- R.-E. Plessix. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications. *Geophys. J. Int.*, 167 : p. 495–503, 2006.
- C. Prada and M. Fink. Eigenmodes of the time reversal operator : A solution to selective focusing in multiple-target media. *Wave Motion*, 20 : p. 151–163, 1994.
- 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. Seismic waveform inversion in the frequency domain, part 1 : Theory and verification in a physical scale model. *Geophysics*, 64(3) : p. 888–901, 1999.
- 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.
- D Vigh and E W Starr. Comparisons for waveform inversion, time domain or frequency domain ? In *2008 SEG Annual Meeting*. Society of Exploration Geophysicists, 2008.
- 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. Virieux and S. Operto. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics. *Geophysics*, 74(6) : p. WCC1–WCC26, 2009.
- 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.