

Imagerie ultrasonore par inversion de formes d'onde

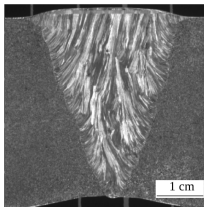
Alice DINSENMEYER

encadrée par
Romain BROSSIER & Ludovic MOREAU
Maîtres de conférences, ISTerre

12 juillet 2016



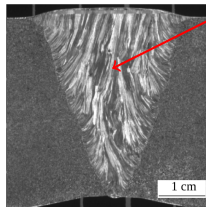
Contexte



Macrographie d'une soudure austénitique*

- méthodes par sommation cohérente de signaux
- Décomposition des matrices de covariance (DORT)

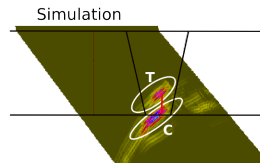
Contexte



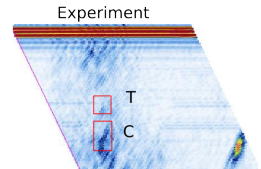
Macrographie d'une soudure austénitique*

Forte anisotropie

↔ déviation et division du faisceau ultrasonore



Simulation



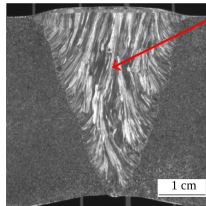
Experiment

- méthodes par sommation cohérente de signaux
- Décomposition des matrices de covariance (DORT)



- ✗ requièrent une connaissance *a priori* de la vitesse
- ✗ sujettes aux artefacts

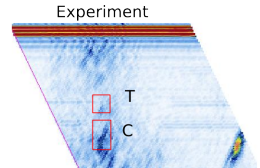
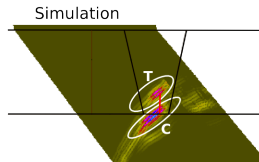
Contexte



Macrographie d'une soudure austénitique*

Forte anisotropie

↔ déviation et division du faisceau ultrasonore



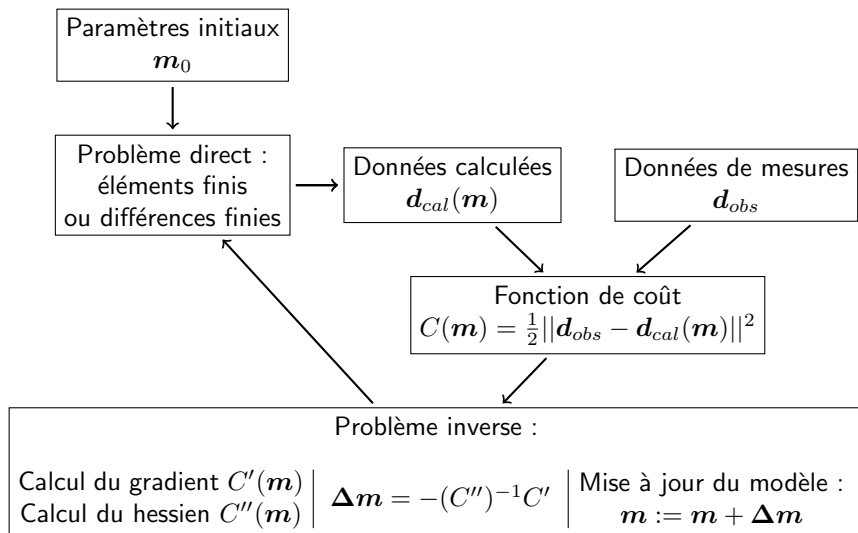
Comparaison d'un modèle (lancer de rayons) et d'une mesure**

- méthodes par sommation cohérente de signaux → ✗ requièrent une connaissance *a priori* de la vitesse
- Décomposition des matrices de covariance (DORT) → ✗ sujettes aux artefacts
- Résolution d'un problème d'optimisation →
 - optimisation topologique : *Dominguez et al., Rodriguez et al.*
 - ✓ reconstruction d'un ensemble de paramètres : FWI

La FWI

- ▶ Méthode d'optimisation locale
- ▶ Développée pour la géophysique
- ▶ *Full waveform inversion* : utilise la totalité du champ d'onde (toutes les arrivées et les amplitudes)

La FWI



La FWI

- ▶ Fonction de coût : $C(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})\|^2$
- ▶ Perturbation du modèle : $\Delta \mathbf{m} = -(C'')^{-1} C'$

La FWI

- Fonction de coût : $C(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})\|^2$
- Perturbation du modèle : $\Delta \mathbf{m} = -(C'')^{-1} \boxed{C'}$



$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = {}^t \tilde{\mathbf{d}}_{cal} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \mathbf{A}^{-1} (\tilde{\mathbf{d}}_{obs} - \tilde{\mathbf{d}}_{cal}) \quad (1)$$

\mathbf{A} : opérateur équation d'onde (élastique ou acoustique)

La FWI

- Fonction de coût : $C(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})\|^2$
- Perturbation du modèle : $\Delta \mathbf{m} = -(C'')^{-1} \boxed{C'}$



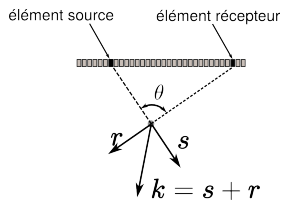
$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = {}^t \tilde{\mathbf{d}}_{cal} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\mathbf{A}^{-1}(\tilde{\mathbf{d}}_{obs} - \tilde{\mathbf{d}}_{cal})}_{\text{résidus rétropropagés}} \quad (1)$$

\mathbf{A} : opérateur équation d'onde (élastique ou acoustique)

Résolution de la FWI

$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = \underbrace{t \tilde{\mathbf{d}}_{cal}}_{\text{champ incident}} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\lambda}_{\text{résidus rétropropagés}}$$

$$\sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \quad \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{r} \cdot \mathbf{x}})$$



Résolution de la FWI

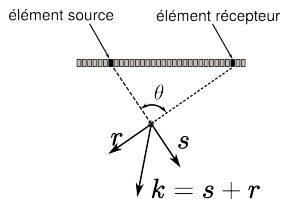
$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = \underbrace{t \tilde{\mathbf{d}}_{cal}}_{\text{champ incident}} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\lambda}_{\text{résidus rétropropagés}}$$

$$\sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \quad \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{r} \cdot \mathbf{x}})$$

► Résolution du gradient :

$$|\mathbf{k}| = |\mathbf{s} + \mathbf{r}| = \frac{\omega}{c} 2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2)$$

$$= \lambda_{min}/2 \quad \text{si } \theta = 0 \quad (3)$$



Résolution de la FWI

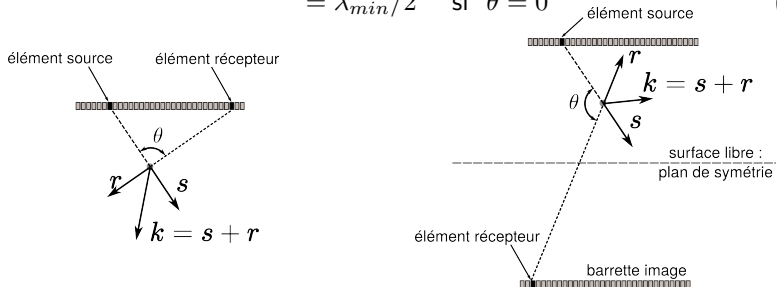
$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = \underbrace{t \tilde{\mathbf{d}}_{cal}}_{\text{champ incident}} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\lambda}_{\text{résidus rétropropagés}}$$

$$\sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \quad \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{r} \cdot \mathbf{x}})$$

► Résolution du gradient :

$$|\mathbf{k}| = |\mathbf{s} + \mathbf{r}| = \frac{\omega}{c} 2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2)$$

$$= \lambda_{min}/2 \quad \text{si } \theta = 0 \quad (3)$$



Résolution de la FWI

$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = \underbrace{t \tilde{d}_{cal}}_{\text{champ incident}} \boxed{t \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right)} \underbrace{\lambda}_{\text{résidus rétropropagés}}$$

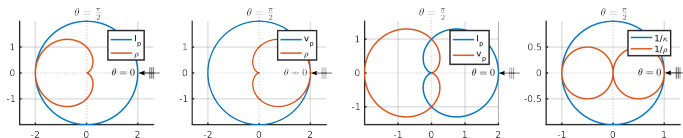
$$\sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \quad \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{r} \cdot \mathbf{x}})$$

- Résolution du gradient :

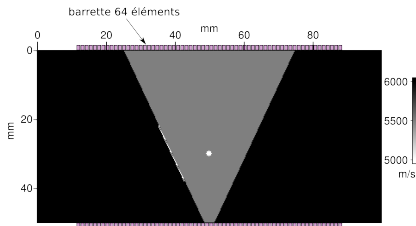
$$|\mathbf{k}| = |\mathbf{s} + \mathbf{r}| = \frac{\omega}{c} 2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2)$$

$$= \lambda_{min}/2 \quad \text{si } \theta = 0 \quad (3)$$

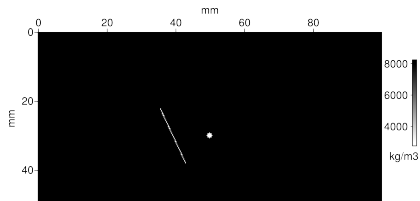
- Rayonnement des paramètres :



Génération des données de référence



Vitesse vraie

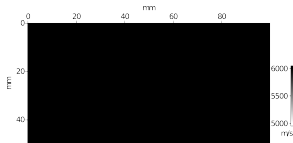


Masse volumique vraie

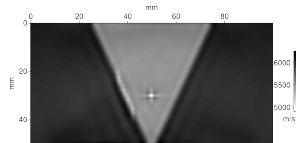


Inversions en milieu isotrope

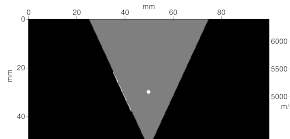
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :



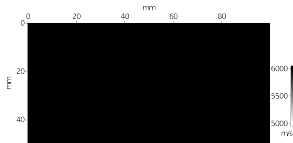
Vitesse vraie :



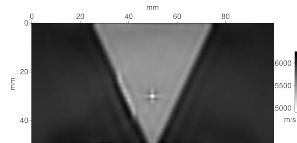


Inversions en milieu isotrope

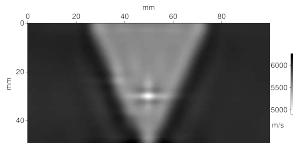
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

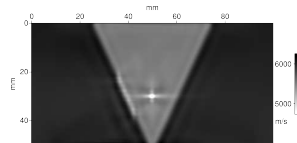


Vitesse Reconstruite :

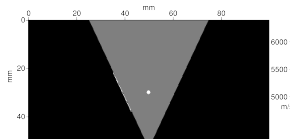


$f \approx 400 \text{ kHz}$

Vitesse Reconstruite :

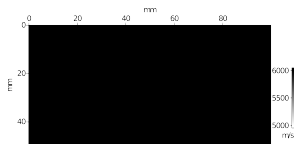


Vitesse vraie :

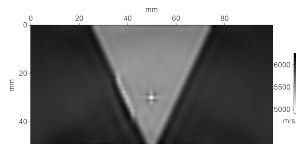


Inversions en milieu isotrope

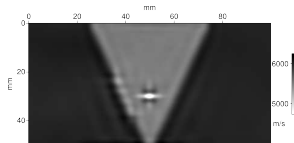
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

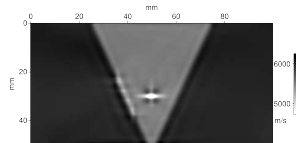


Vitesse Reconstruite :

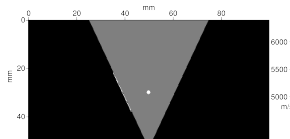


$f \approx 1 \text{ MHz}$

Vitesse Reconstruite :



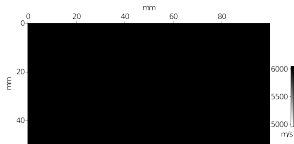
Vitesse vraie :



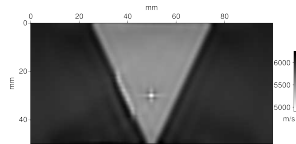


Inversions en milieu isotrope

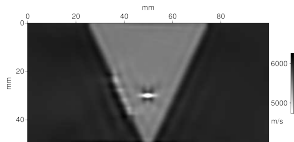
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

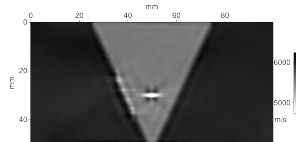


Vitesse Reconstituée :

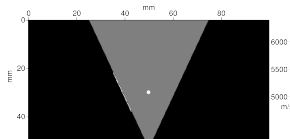


$f \approx 1,4 \text{ MHz}$

Vitesse Reconstituée :

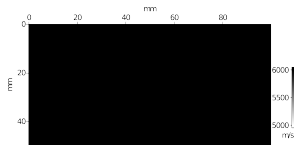


Vitesse vraie :

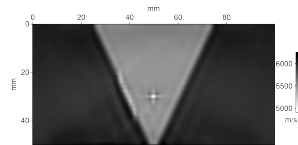


Inversions en milieu isotrope

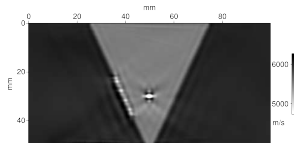
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

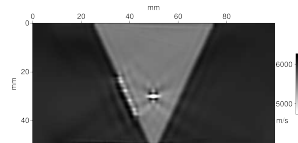


Vitesse Reconstruite :

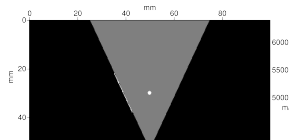


$\approx 2 \text{ MHz}$

Vitesse Reconstruite :



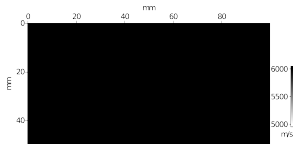
Vitesse vraie :



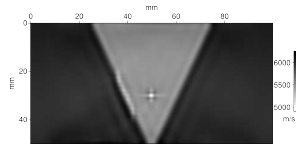


Inversions en milieu isotrope

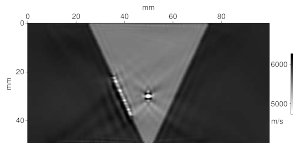
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

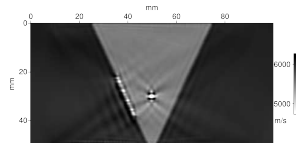


Vitesse Reconstruite :

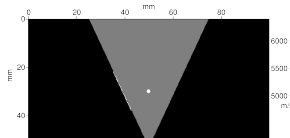


$f \approx 3 \text{ MHz}$

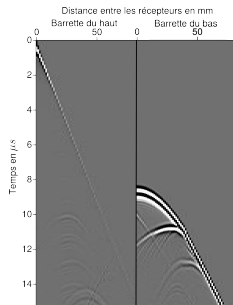
Vitesse Reconstruite :



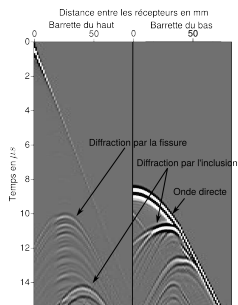
Vitesse vraie :



Inversion monoparamètre

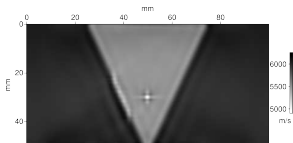


Signaux issus de ρ homogène

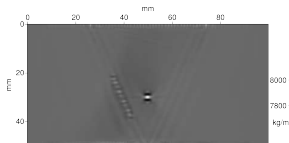


Signaux issus de ρ vraie

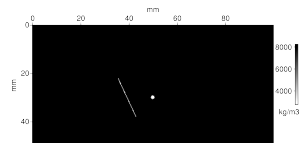
Modèle initial de vitesse :



Masse volumique
reconstruite :

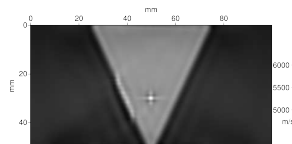


Masse volumique vraie :

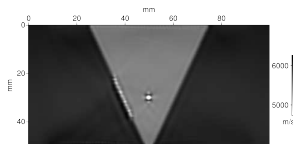


Inversion multiparamètre

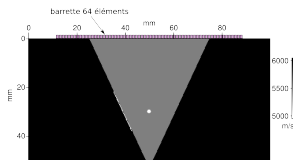
Vitesse initiale :



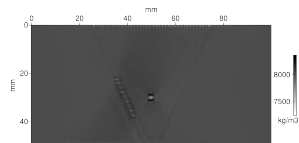
Vitesse reconstruite :



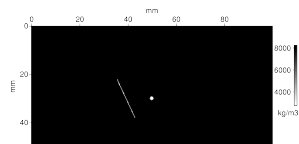
Vitesse vraie :



Masse volumique reconstruite :

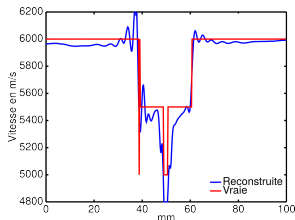


Masse volumique vraie :

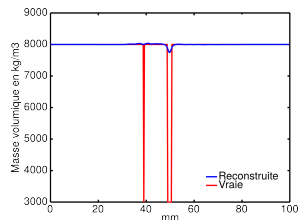


► Inversion monoparamètre :

Vitesse :

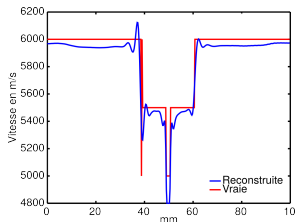


Masse volumique :

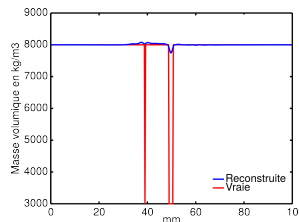


► Inversion multiparamètre :

Vitesse :



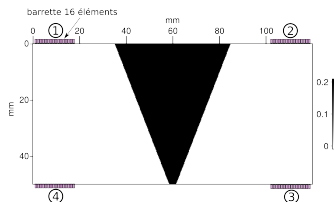
Masse volumique :



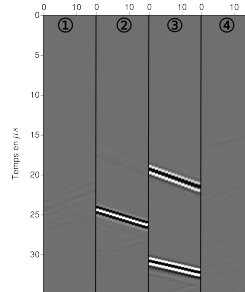
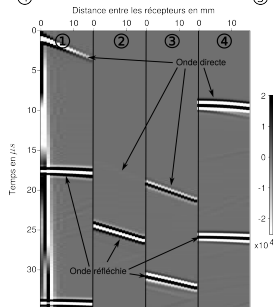
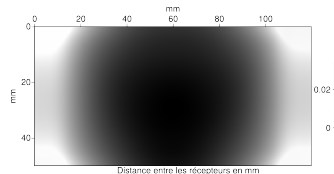
Inversions en milieu anisotrope

Paramètre d'anisotropie : $\epsilon = \frac{v_p \cdot e_x - v_p \cdot e_z}{v_p \cdot e_z}$

ϵ vrai :



ϵ reconstruit :



Perspectives

- ▶ Prise en compte de l'anisotropie :
 - ▶ en acoustique : par un modèle transverse isotrope incliné
 - ▶ en élastique : par $6 \times C_{ij}$
- ▶ Prise en compte de la propagation 3D
- ▶ Élaboration d'un modèle initial fiable

- 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.
- A. Gardahaut, H. Lourme, F. Jenson, S. Lin, and M. Nagai. Ultrasonic wave propagation in dissimilar metal welds—application of a ray-based model and comparison with experimental results. In *11th European Conference on Non-Destructive Testing*, 2014.

questions : différence avec tomo diffraction
défaut : air