

Imagerie ultrasonore de soudure par inversion de formes d'onde

Alice DINSENMEYER

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

12 juillet 2016



Contexte



Image Davidmack

Contrôle sur pipeline

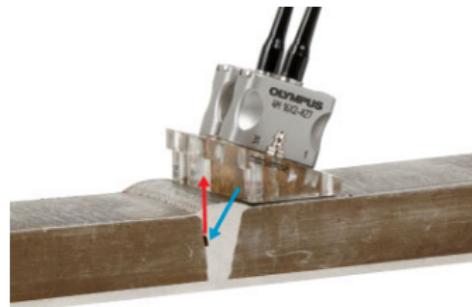


Image Olympus

Exemple de test en réflexion

Contrôle et évaluation de soudure :

- ▶ de centrales nucléaires (système de refroidissement)
 - ▶ de pipelines
- porosité, fissure, manque de fusion, corrosion, corps étrangers, . . .

Contexte

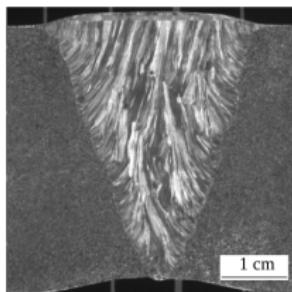
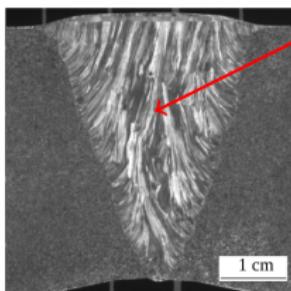


Image extraite de Chassignole, 2010

Macrographie d'une soudure austénitique

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

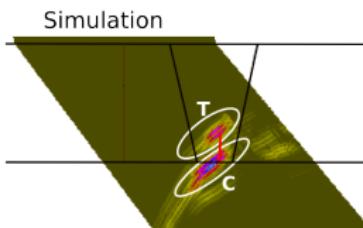
Contexte



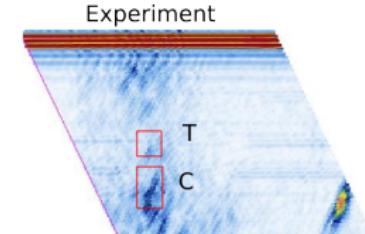
Macrographie d'une soudure austénitique

Forte anisotropie

→ déviation et division du faisceau ultrasonore



Images extraites de Gardahaut, 2014



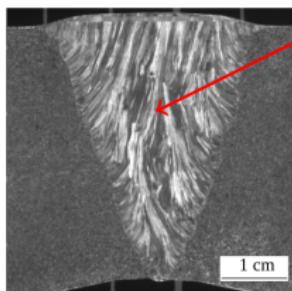
Comparaison d'un modèle (lancer de rayons) et d'une mesure

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



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

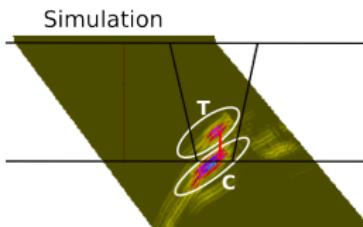
Contexte



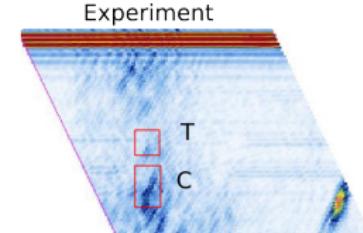
Macrographie d'une soudure austénitique

Forte anisotropie

→ déviation et division du faisceau ultrasonore



Images extraites de Gardahaut, 2014



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

- méthodes par sommation cohérente des signaux
- Décomposition des matrices de covariance (DORT)
- Résolution d'un problème d'optimisation

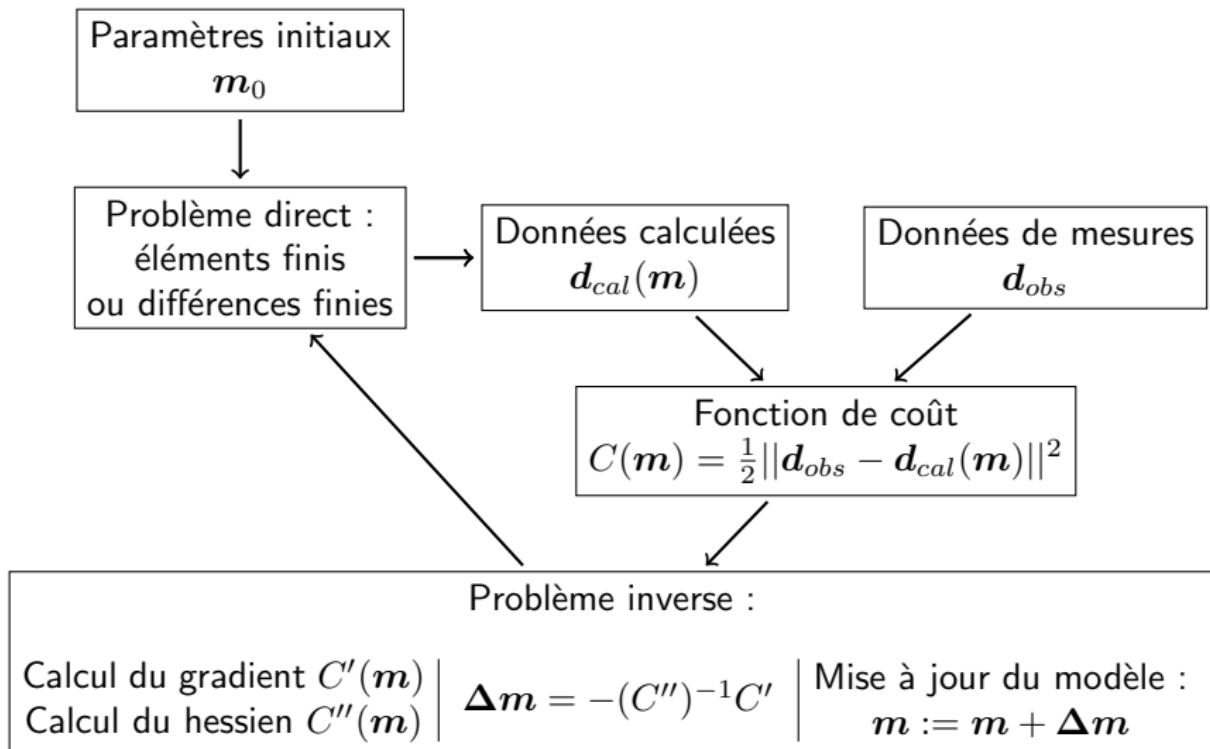


- ✗ requièrent une connaissance *a priori* de la vitesse
- ✗ sujettes aux artefacts
- ▶ optimisation topologique : *Dominguez et al., Rodriguez et al.*
- ✓ reconstruction d'un ensemble de paramètres : FWI

La Full Waveform Inversion

- ▶ Estimation des paramètres acoustiques ou élastiques
 → optimisation locale
- ▶ Développée pour la géophysique
- ▶ Utilise la totalité du champ d'onde (toutes les arrivées et amplitudes)

La FWI



Résolution de la FWI

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

Résolution de la FWI

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

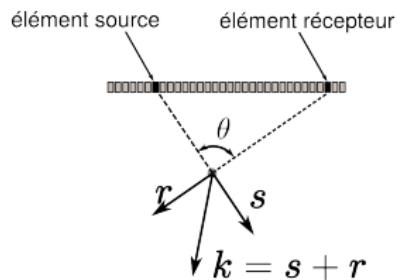
$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = {}^t \tilde{\mathbf{d}}_{cal} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\mathbf{A}^{-1} (\tilde{\mathbf{d}}_{obs} - \tilde{\mathbf{d}}_{cal})}_{\text{résidus rétropropagés}} \quad (1)$$

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

Résolution de la FWI

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

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



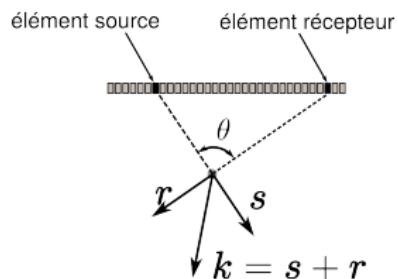
Résolution de la FWI

$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = \underbrace{\tilde{d}_{cal}^t}_{\text{champ incident}} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\lambda}_{\text{résidus rétropagés}} \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{r} \cdot \mathbf{x}})$$

► Résolution du gradient :

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

↪ maximale ($\lambda/2$) en HF et pour $\theta = 0$



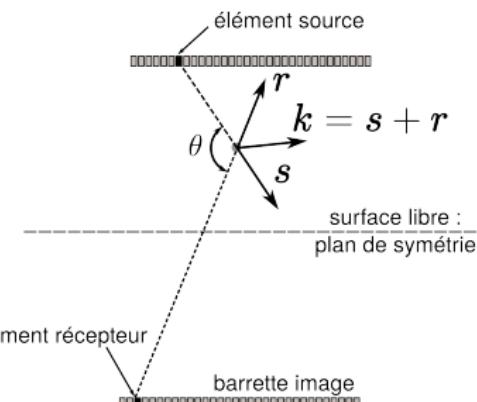
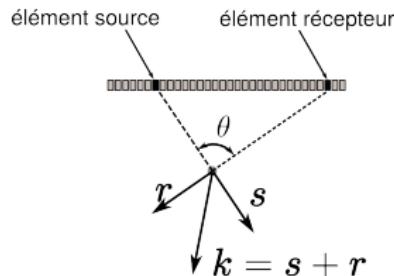
Résolution de la FWI

$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = \underbrace{\tilde{d}_{cal}^t}_{\text{champ incident}} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\lambda}_{\text{résidus rétropagés}} \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{r} \cdot \mathbf{x}})$$

► Résolution du gradient :

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

→ maximale ($\lambda/2$) en HF et pour $\theta = 0$



Résolution de la FWI

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

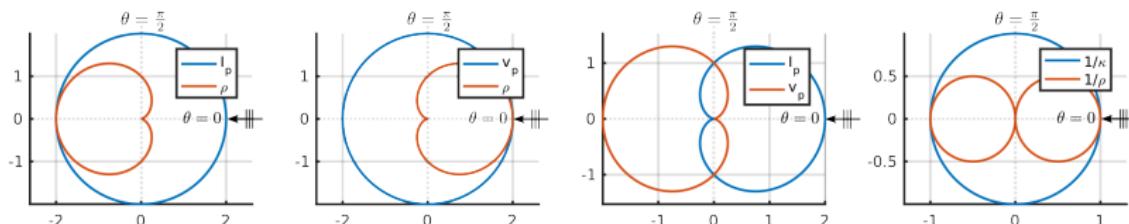
$$\sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \quad \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{r} \cdot \mathbf{x}})$$

► Résolution du gradient :

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

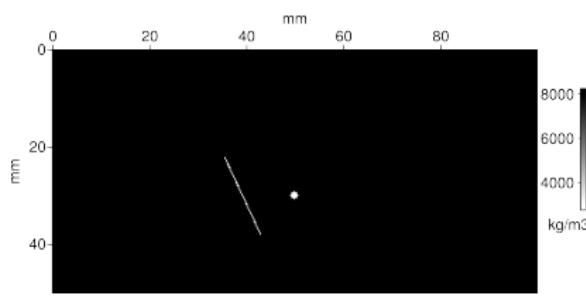
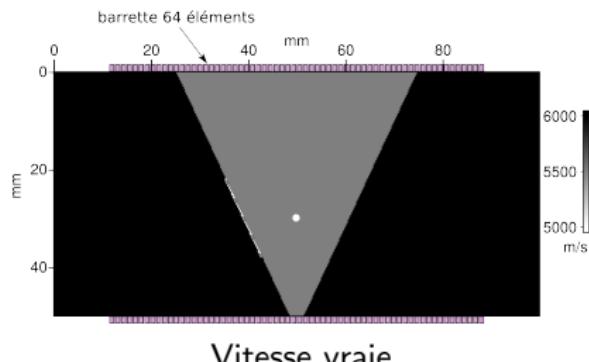
↪ maximale ($\lambda/2$) en HF et pour $\theta = 0$

► Rayonnement des paramètres :



Inversions en milieu isotrope

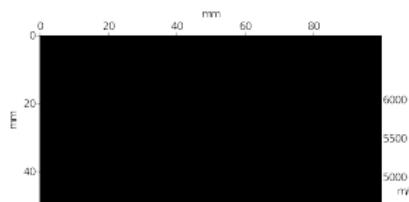
- ▶ Milieu 2D, isotrope, acoustique
- ▶ Paramétrisation : vitesse + masse volumique
- ▶ Excitation : Ricker centré à 2 MHz



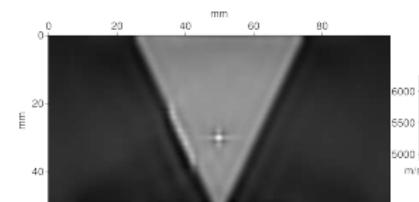
- ▶ 9 inversions successives de 200 kHz à 3 MHz pour
 - ▶ mieux contraindre le problème
 - ▶ lever les ambiguïtés de déphasage

Inversions en milieu isotrope – Vitesse

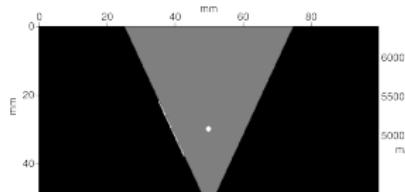
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

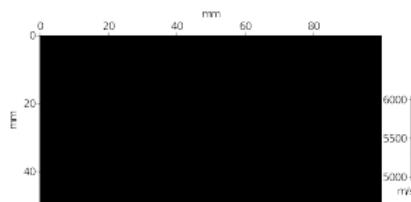


Vitesse vraie :

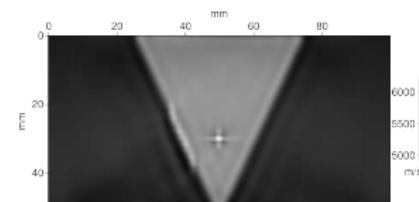


Inversions en milieu isotrope – Vitesse

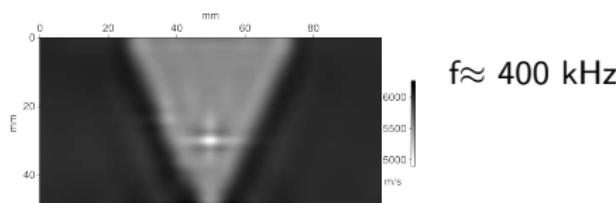
Modèle initial de vitesse :



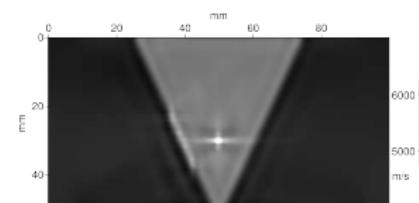
Modèle initial de vitesse :



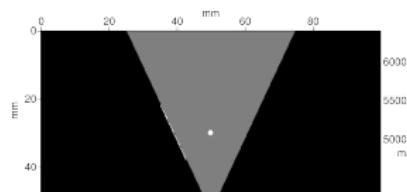
Vitesse Reconstituée :



Vitesse Reconstituée :

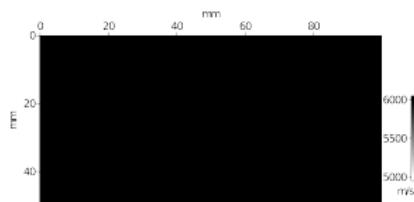


Vitesse vraie :

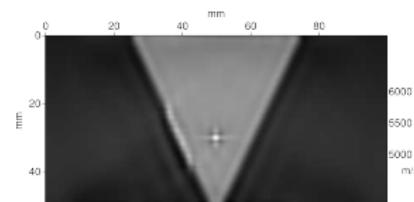


Inversions en milieu isotrope – Vitesse

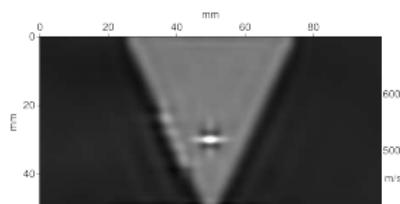
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

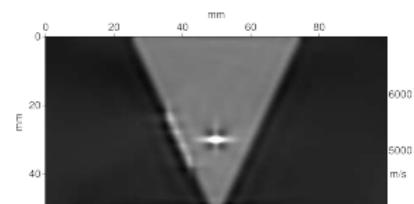


Vitesse Reconstituée :

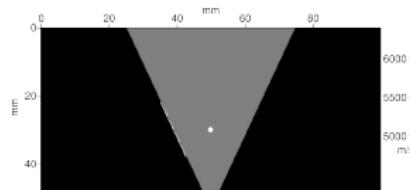


$f \approx 1 \text{ MHz}$

Vitesse Reconstituée :

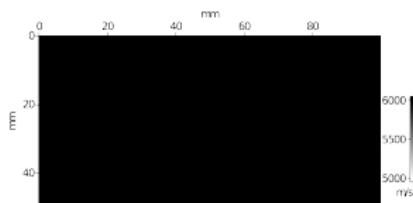


Vitesse vraie :

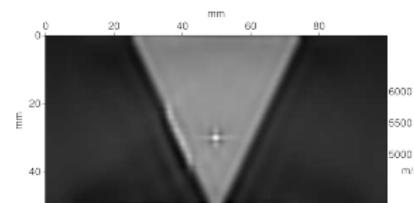


Inversions en milieu isotrope – Vitesse

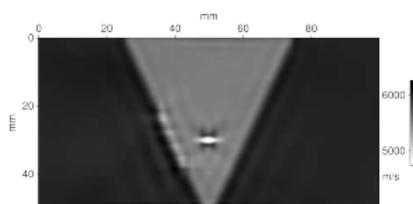
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

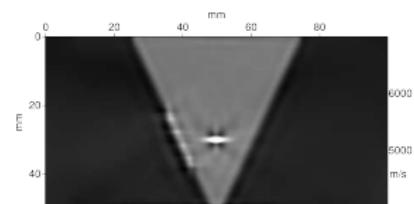


Vitesse Reconstituée :

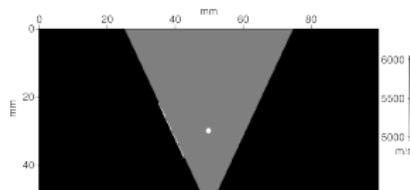


$f \approx 1.4$ MHz

Vitesse Reconstituée :

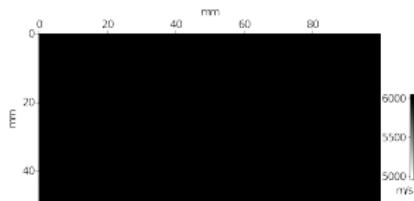


Vitesse vraie :

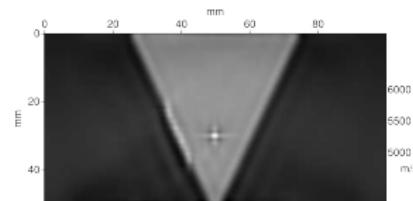


Inversions en milieu isotrope – Vitesse

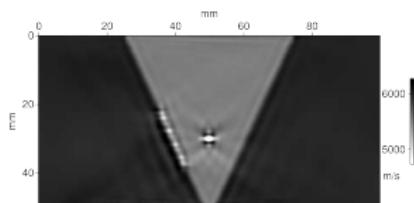
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

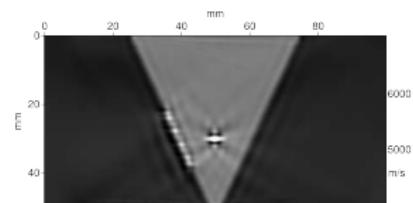


Vitesse Reconstituée :

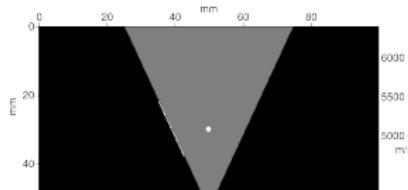


$f \approx 2$ MHz

Vitesse Reconstituée :

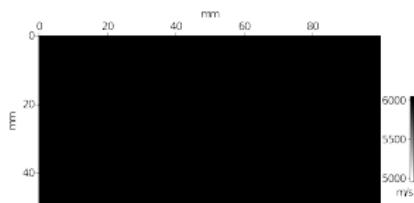


Vitesse vraie :

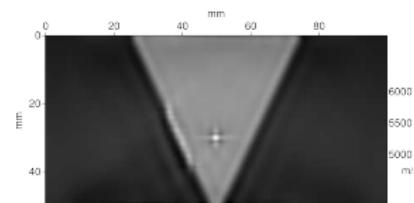


Inversions en milieu isotrope – Vitesse

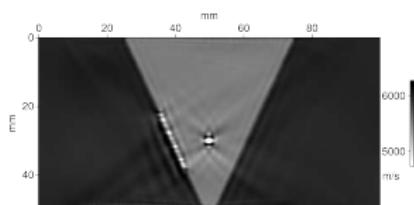
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

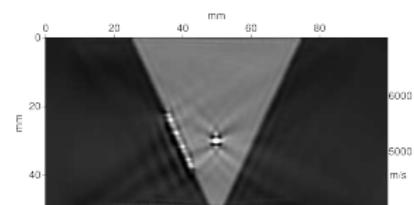


Vitesse Reconstituée :

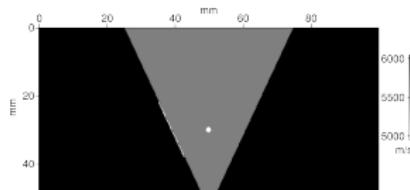


$\approx 3 \text{ MHz}$

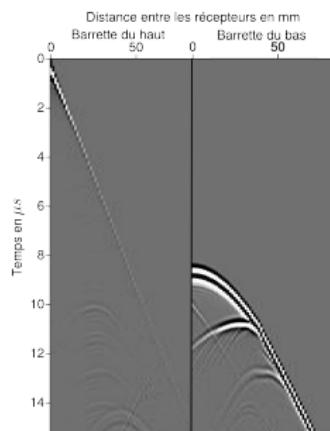
Vitesse Reconstituée :



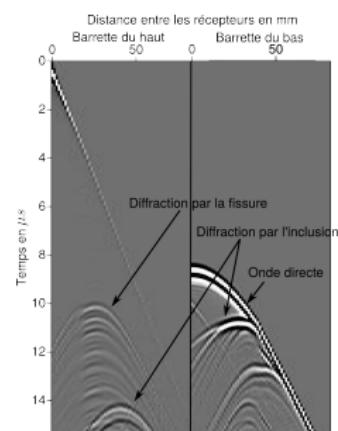
Vitesse vraie :



Inversions en milieu isotrope – Densité

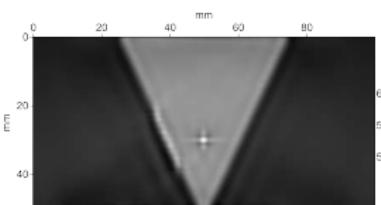


Signaux issus de ρ homogène

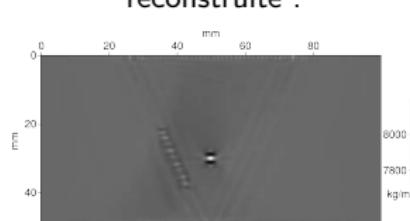


Signaux issus de ρ vraie

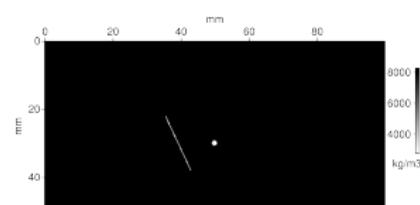
Modèle initial de vitesse :



Masse volumique
reconstruite :

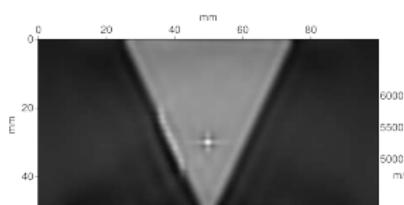


Masse volumique vraie :

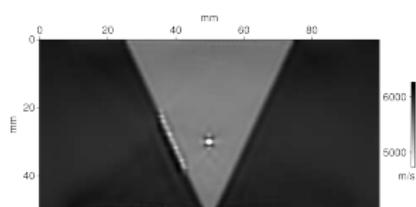


Inversions en milieu isotrope – Multiparamètre

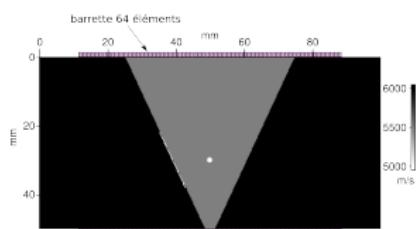
Vitesse initiale :



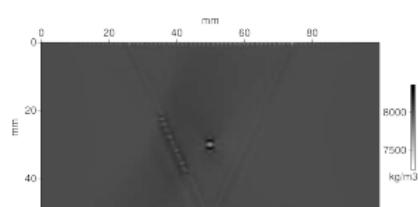
Vitesse reconstruite :



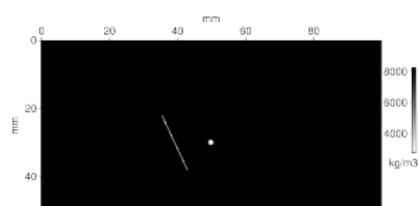
Vitesse vraie :



Masse volumique reconstruite :

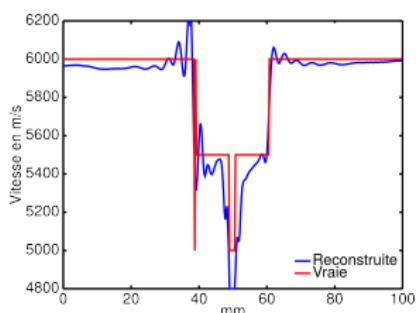


Masse volumique vraie :

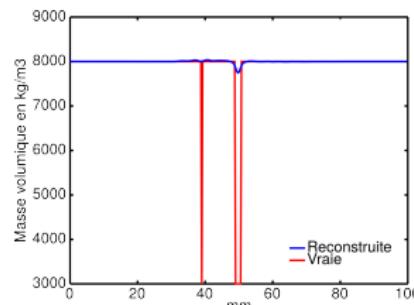


► Inversion monoparamètre :

Vitesse :

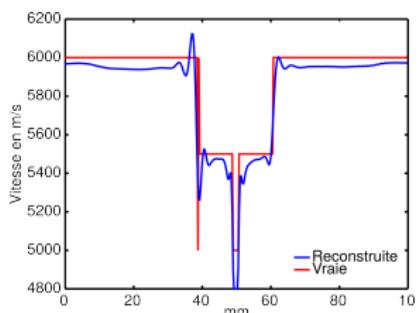


Masse volumique :

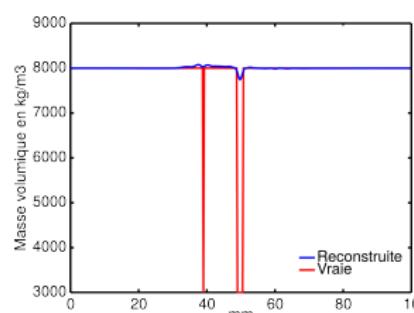


► Inversion multiparamètre :

Vitesse :



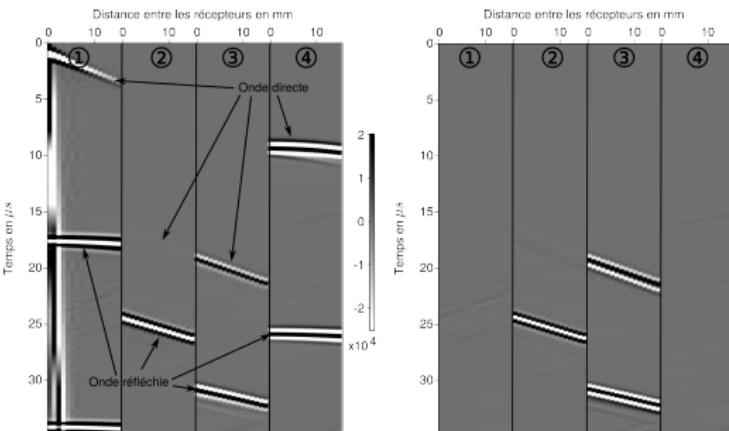
Masse volumique :



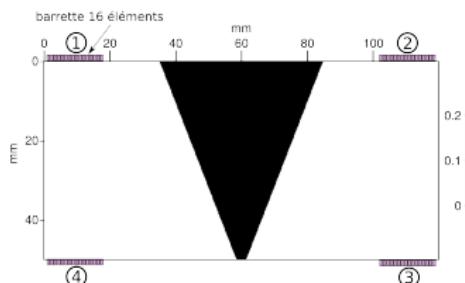
Inversions en milieu anisotrope

- Milieu acoustique, isotrope transverse (axe de symétrie horizontal)
- Paramètre d'anisotropie :

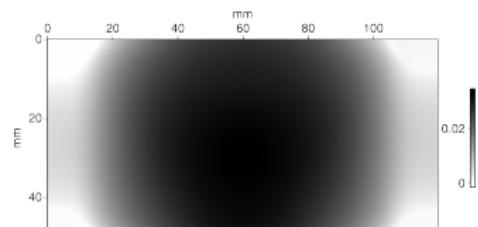
$$\epsilon = \frac{\mathbf{v}_p \cdot \mathbf{e}_x - \mathbf{v}_p \cdot \mathbf{e}_z}{\mathbf{v}_p \cdot \mathbf{e}_z}$$



ϵ vrai :



ϵ reconstruit :

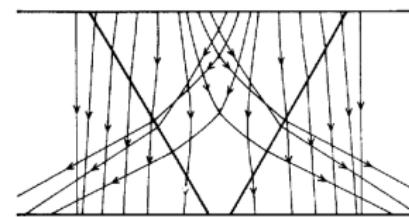
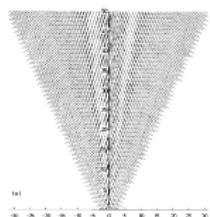


Conclusions et perspectives

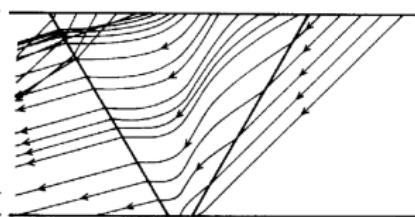
- ▶ Inversion multiparamètre : corrige les artefacts

Conclusions et perspectives

- ▶ Inversion multiparamètre : corrige les artefacts
- ▶ Prise en compte de l'anisotropie :
 - ▶ en acoustique : par un modèle isotrope transverse incliné
 - ▶ en élastique : par $6 \times C_{ij}$



Images extraites de Ogilvy, 1986

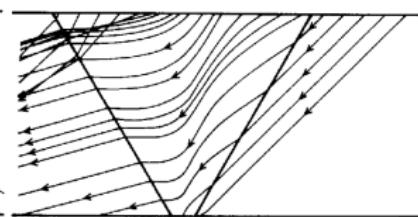
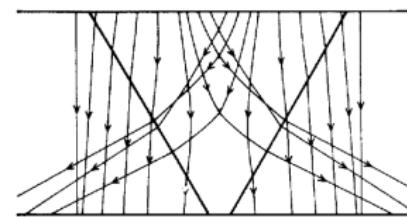
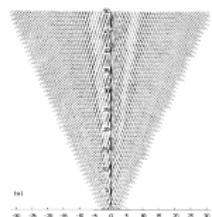


(a) Modèle d'orientation des grains

(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

Conclusions et perspectives

- ▶ Inversion multiparamètre : corrige les artefacts
- ▶ Prise en compte de l'anisotropie :
 - ▶ en acoustique : par un modèle isotrope transverse incliné
 - ▶ en élastique : par $6 \times C_{ij}$



Images extraites de Ogilvy, 1986

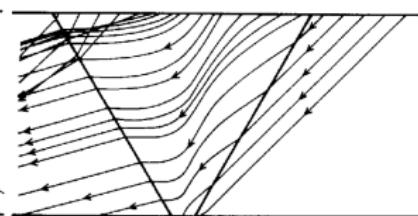
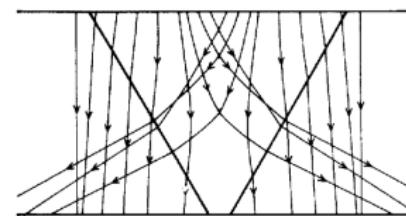
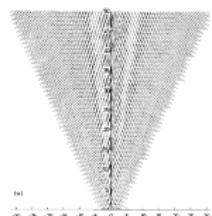
(a) Modèle d'orientation des grains

(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

- ▶ Élaboration d'un modèle initial fiable

Conclusions et perspectives

- ▶ Inversion multiparamètre : corrige les artefacts
- ▶ Prise en compte de l'anisotropie :
 - ▶ en acoustique : par un modèle isotrope transverse incliné
 - ▶ en élastique : par $6 \times C_{ij}$



Images extraits de Ogilvy, 1986

(a) Modèle d'orientation des grains

(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

- ▶ Élaboration d'un modèle initial fiable
- ▶ Prise en compte de la propagation 3D

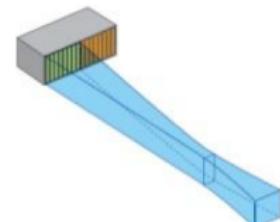
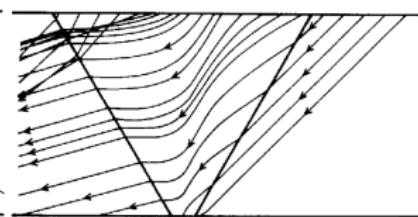
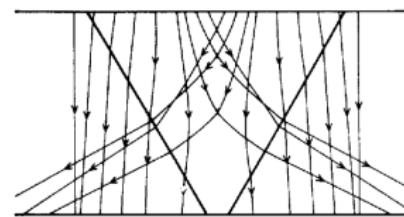
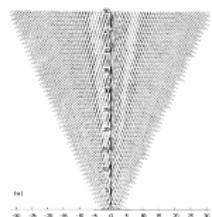


Image Olympus

Conclusions et perspectives

- ▶ Inversion multiparamètre : corrige les artefacts
- ▶ Prise en compte de l'anisotropie :
 - ▶ en acoustique : par un modèle isotrope transverse incliné
 - ▶ en élastique : par $6 \times C_{ij}$



Images extraits de Ogilvy, 1986

(a) Modèle d'orientation des grains

(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

- ▶ Élaboration d'un modèle initial fiable
- ▶ Prise en compte de la propagation 3D
- ▶ Géométrie d'acquisition à adapter
 - ▶ à la géométrie de la soudure réelle
 - ▶ pour une une bonne illumination/résolution

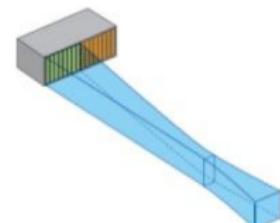


Image Olympus

questions :
défaut : air
focalisation