

# 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

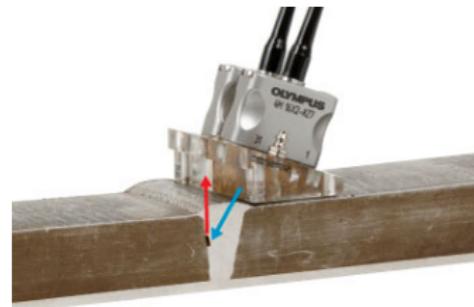


Image Olympus

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

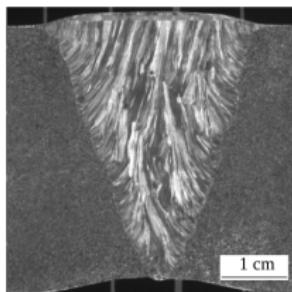


Image extraite de Chassignole, 2010

Macrographie d'une soudure austénitique

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

# Contexte

## Forte anisotropie imprévisible

→ déviation et division du faisceau ultrasonore

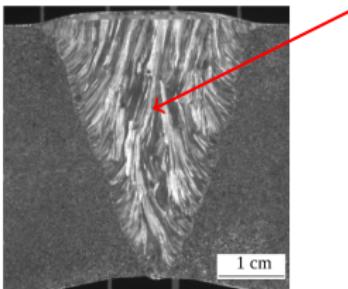
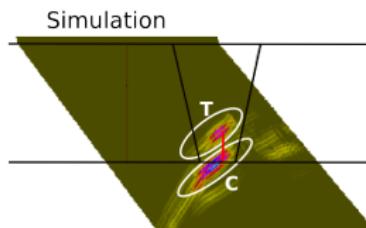
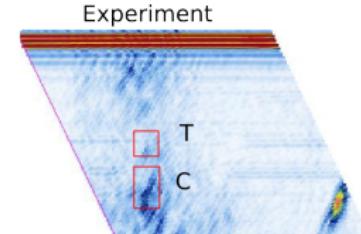


Image extraite de Chassignole, 2010

Macrographie d'une soudure austénitique



Images extraites de Gardahaut, 2014



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

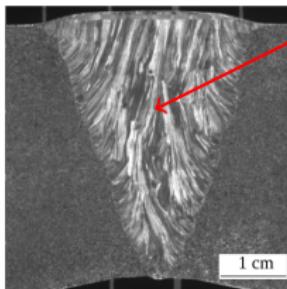
- méthodes par sommation cohérente des signaux
- Décomposition des matrices de covariance (DORT)



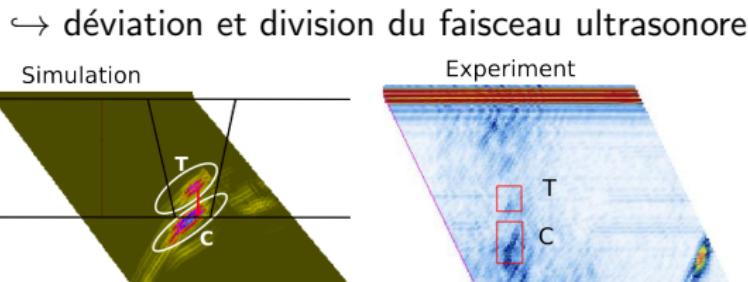
- ✗ requièrent une connaissance *a priori* de la vitesse
- ✗ sujettes aux artefacts

# Contexte

## Forte anisotropie imprévisible



Macrographie d'une soudure austénitique



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

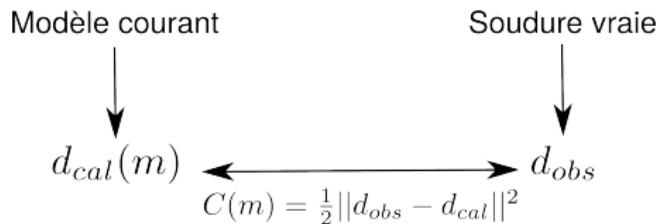
- méthodes par sommation cohérente des signaux
- Décomposition des matrices de covariance (DORT)
- Résolution d'un problème d'optimisation



- ✗ 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

- ▶ Développée pour la géophysique
- ▶ Estimation des paramètres acoustiques ou élastiques  
    ↪ optimisation locale



# 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 :  $\Delta \mathbf{m} = -(C'')^{-1} C'$

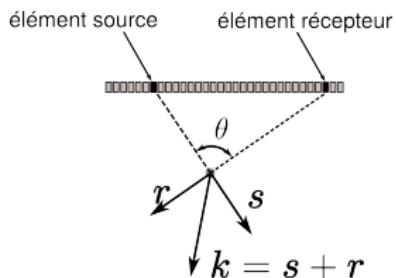
$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = {}^t \tilde{\mathbf{d}}_{cal} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\mathbf{A}^{-1} (\tilde{\mathbf{d}}_{obs} - \tilde{\mathbf{d}}_{cal})}_{\text{résidus rétropropagés}} \quad (1)$$

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

# Résolution de la FWI

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

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



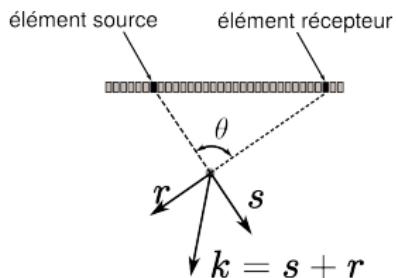
# Résolution de la FWI

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

► 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  $\theta = 0$



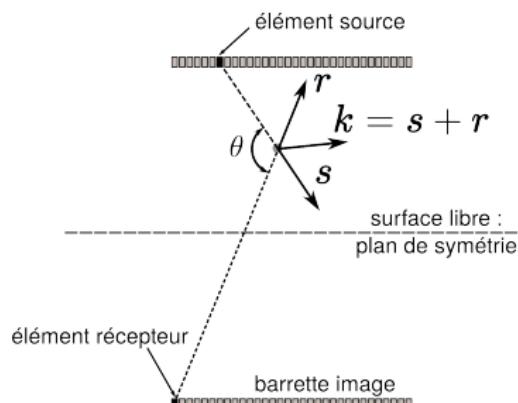
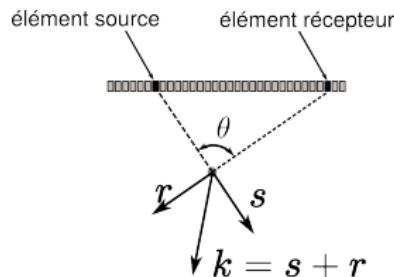
# Résolution de la FWI

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

► 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

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

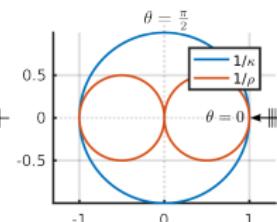
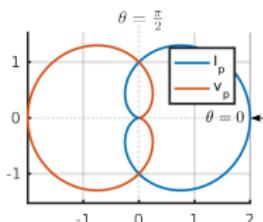
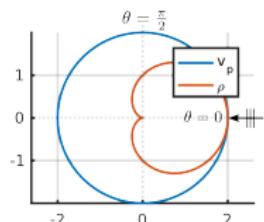
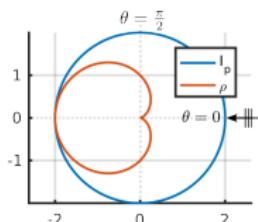
$$\sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \quad \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{r} \cdot \mathbf{x}})$$

► Résolution du gradient :

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

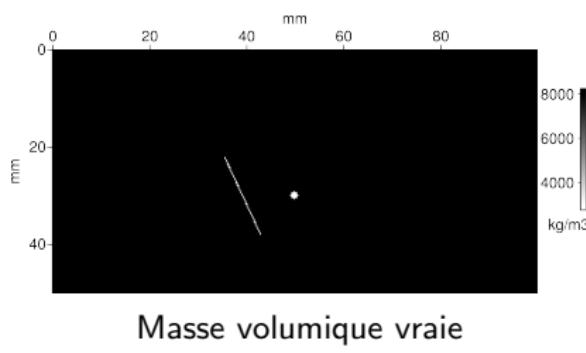
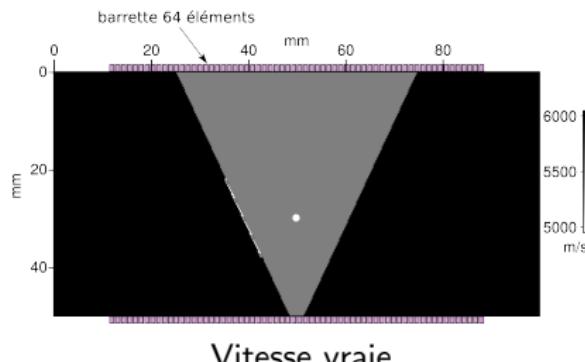
↪ maximale ( $\lambda/2$ ) en HF et pour  $\theta = 0$

► Rayonnement des paramètres :



# Inversions en milieu isotrope

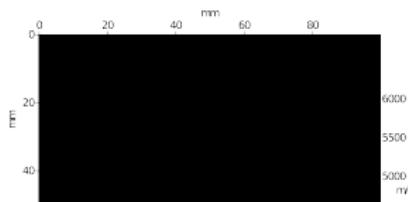
- ▶ Milieu 2D, isotrope, acoustique
- ▶ Paramétrisation : vitesse + masse volumique
- ▶ Excitation : Ricker centré à 2 MHz



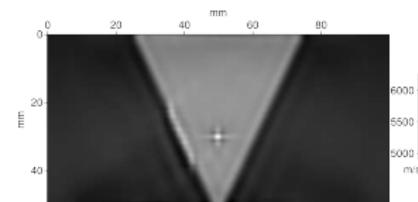
- ▶ 9 inversions successives de 200 kHz à 3 MHz pour
  - ▶ mieux contraindre le problème
  - ▶ lever les ambiguïtés de déphasage

# Inversions en milieu isotrope – Vitesse

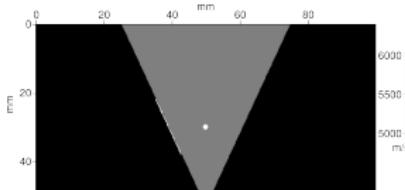
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

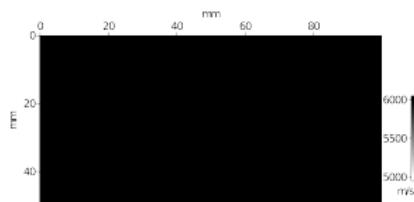


Vitesse vraie :

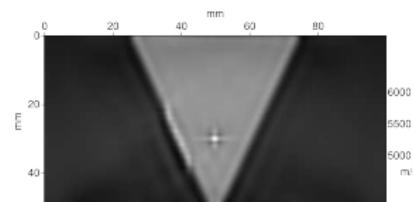


# Inversions en milieu isotrope – Vitesse

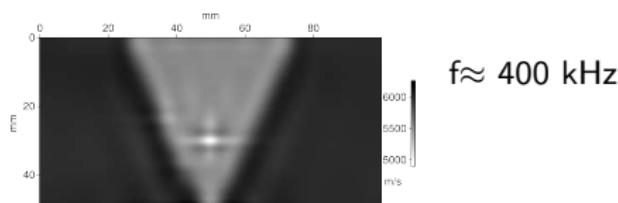
Modèle initial de vitesse :



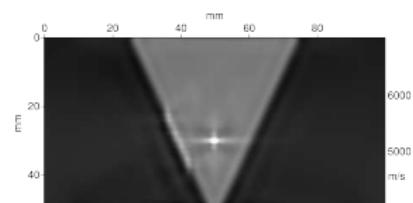
Modèle initial de vitesse :



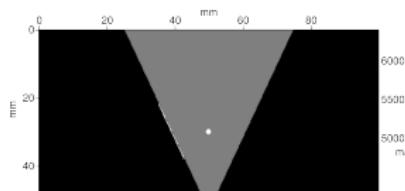
Vitesse Reconstituée :



Vitesse Reconstituée :

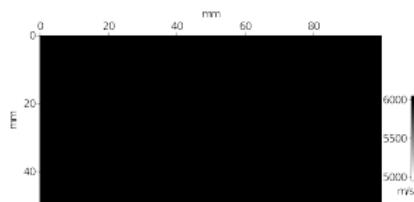


Vitesse vraie :

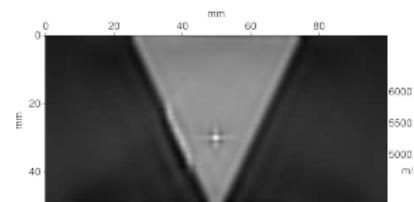


# Inversions en milieu isotrope – Vitesse

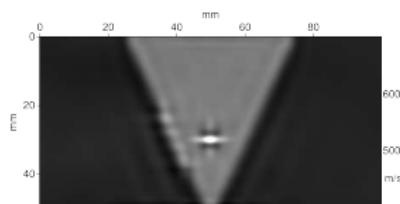
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

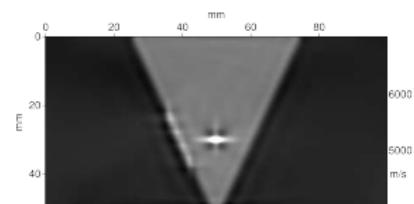


Vitesse Reconstituée :

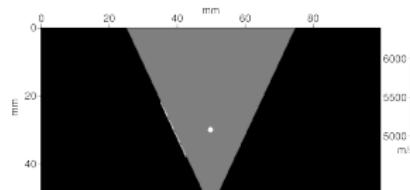


$f \approx 1 \text{ MHz}$

Vitesse Reconstituée :

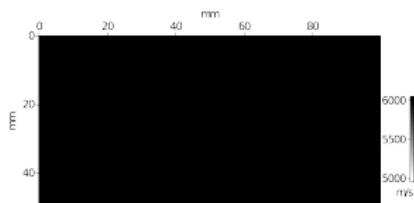


Vitesse vraie :

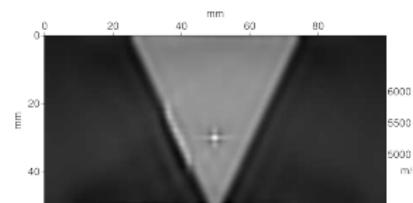


# Inversions en milieu isotrope – Vitesse

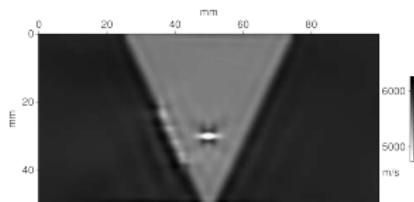
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

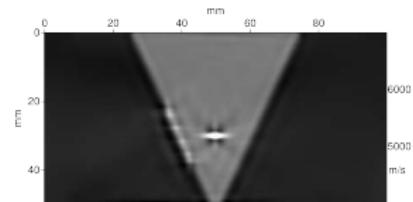


Vitesse Reconstituée :

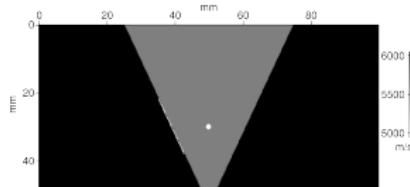


$f \approx 1.4 \text{ MHz}$

Vitesse Reconstituée :

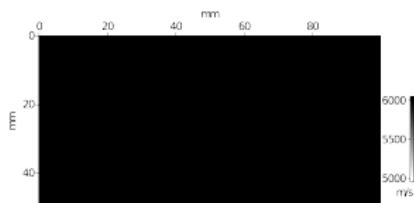


Vitesse vraie :

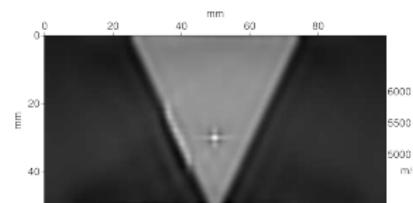


# Inversions en milieu isotrope – Vitesse

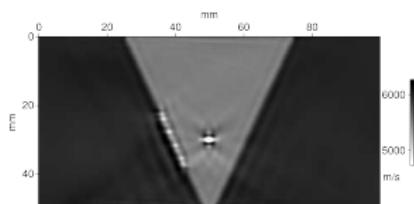
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

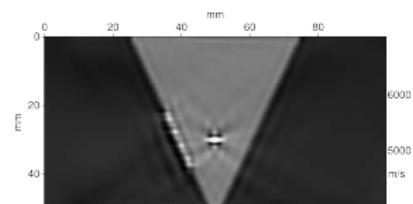


Vitesse Reconstituée :

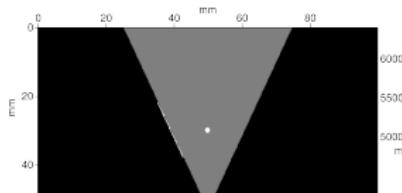


$f \approx 2 \text{ MHz}$

Vitesse Reconstituée :

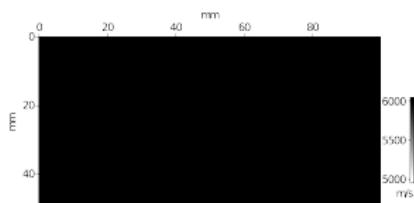


Vitesse vraie :

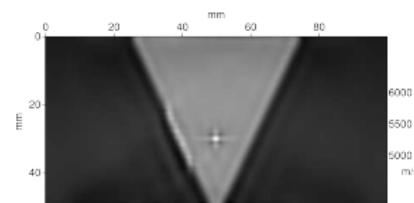


# Inversions en milieu isotrope – Vitesse

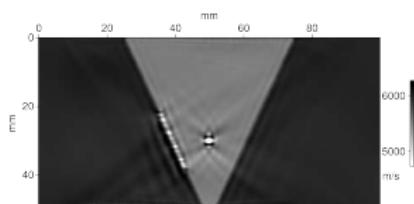
Modèle initial de vitesse :



Modèle initial de vitesse :

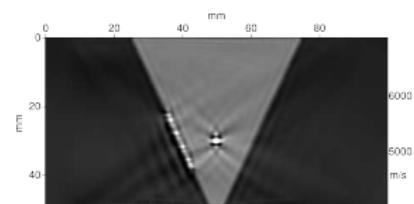


Vitesse Reconstituée :

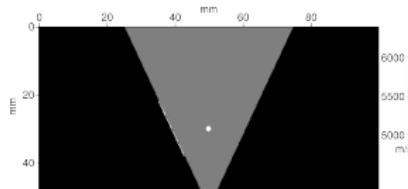


$f \approx 3 \text{ MHz}$

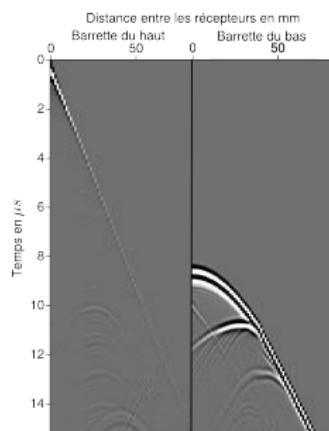
Vitesse Reconstituée :



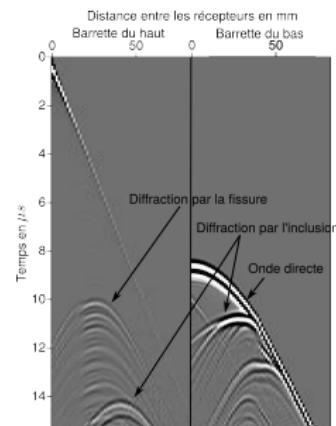
Vitesse vraie :



# Inversions en milieu isotrope – Densité

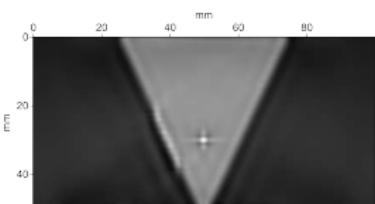


Signaux issus de  $\rho$  homogène



Signaux issus de  $\rho$  vraie

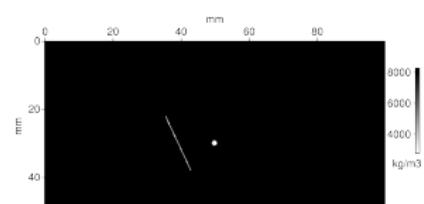
Modèle initial de vitesse :



Masse volumique reconstruite :

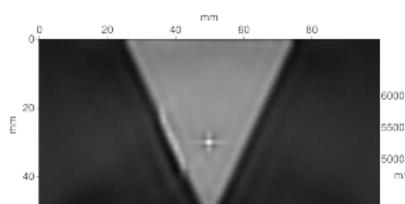


Masse volumique vraie :

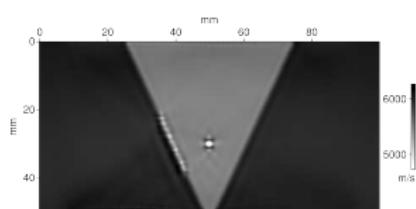


# Inversions en milieu isotrope – Multiparamètre

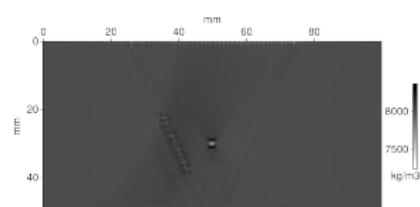
Vitesse initiale :



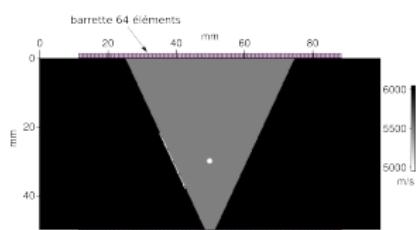
Vitesse reconstruite :



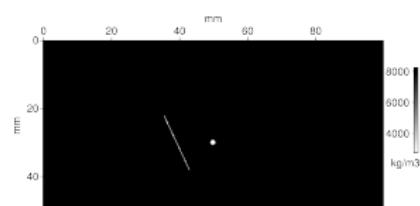
Masse volumique reconstruite :



Vitesse vraie :

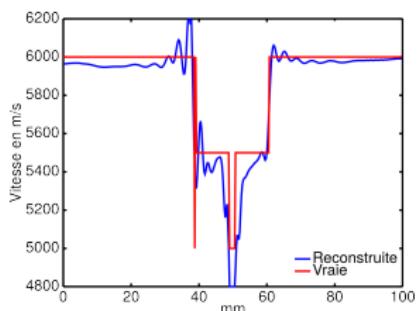


Masse volumique vraie :

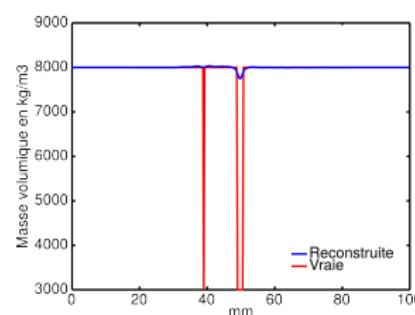


► Inversion monoparamètre :

Vitesse :

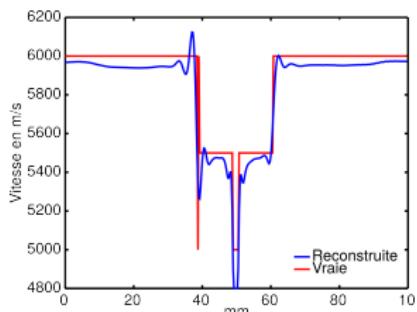


Masse volumique :

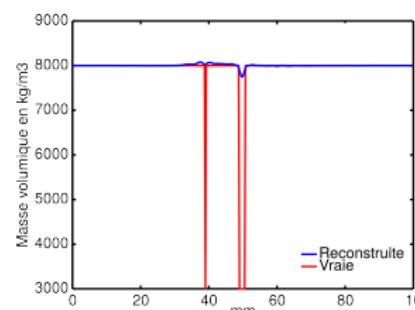


► Inversion multiparamètre :

Vitesse :



Masse volumique :



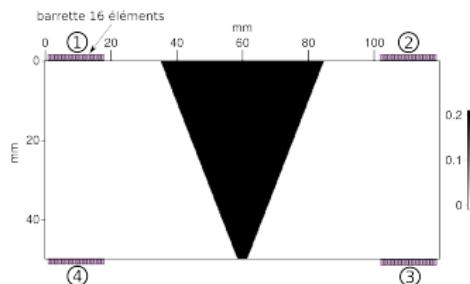
Coupes horizontales à 3cm de profondeur

# Inversions en milieu anisotrope

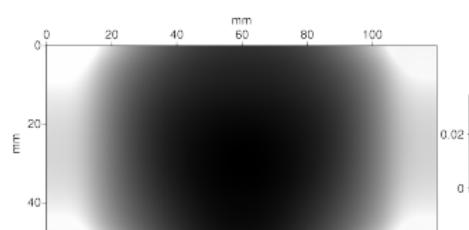
- ▶ Milieu acoustique, isotrope transverse (axe de symétrie horizontal)
- ▶ Paramètre d'anisotropie :

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

$\epsilon$  vrai :



$\epsilon$  reconstruit :



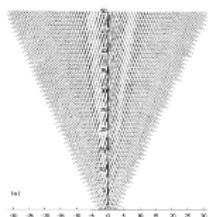
- ▶ Trajets horizontaux porteurs d'information :  $\theta = \pi \rightarrow k \sim 0$
- ▶ Modèle peu représentatif

# Conclusions et perspectives

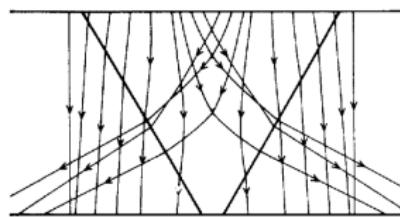
- ▶ Inversion multiparamètre : corrige les artefacts

# 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  $6 \times C_{ij}$

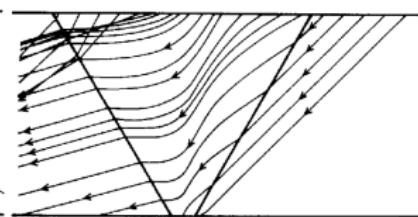


(a) Modèle d'orientation des grains



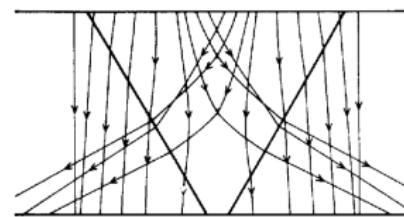
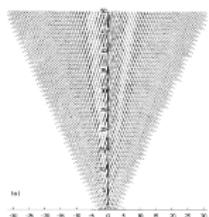
Images extraites de Oggilvy, 1986

(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

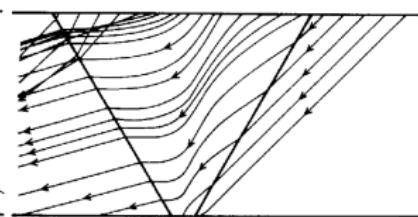


# Conclusions et perspectives

- ▶ 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



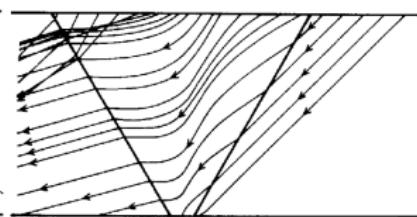
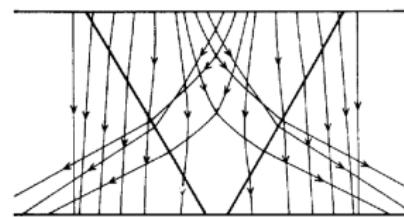
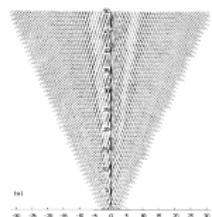
(a) Modèle d'orientation des grains

(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

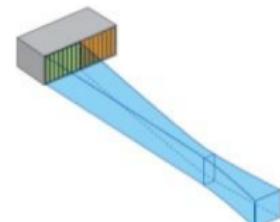
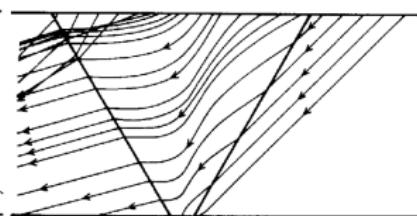
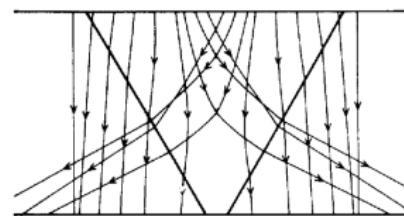
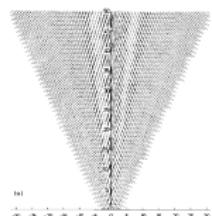


Image Olympus

# 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

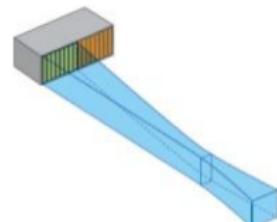


Image Olympus

questions :  
défaut : air  
focalisation