

# Imagerie ultrasonore de soudures 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

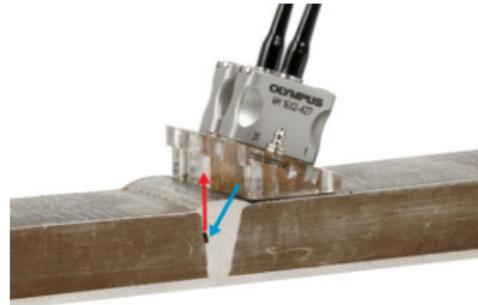


Image Olympus

Exemple de test en réflexion

Contrôle et évaluation de soudures :

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

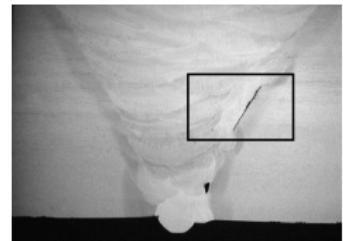
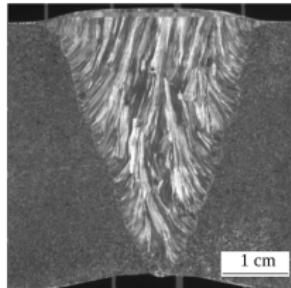


Image extraite de Consonni et al.,  
Insight, 2011

# Contexte



*Image extraite de Chassignole, 2010*

Macrographie d'une soudure austénitique

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

# Contexte

## Forte anisotropie imprévisible

→ déviation et division du faisceau ultrasonore

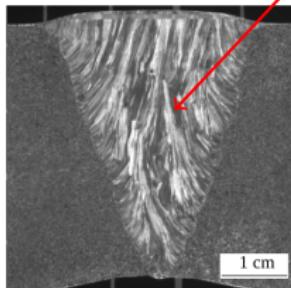
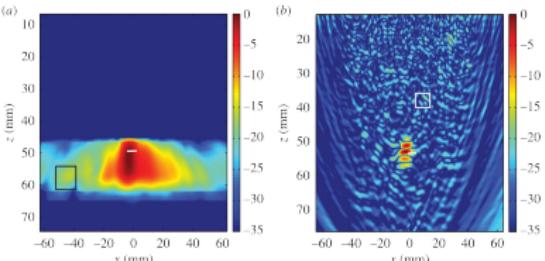


Image extraite de Chassaignole, 2010

Macrographie d'une soudure austénitique



Images extraites de Cunningham et al., Proc. R. Soc., 2016

Méthodes DORT (gauche) et FTP (droite)  
sur modèle EF de soudure anisotrope

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



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

# Contexte

## Forte anisotropie imprévisible

→ déviation et division du faisceau ultrasonore

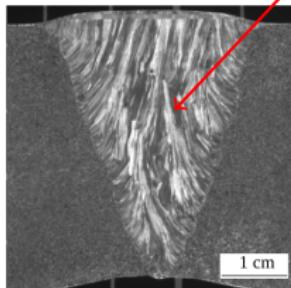
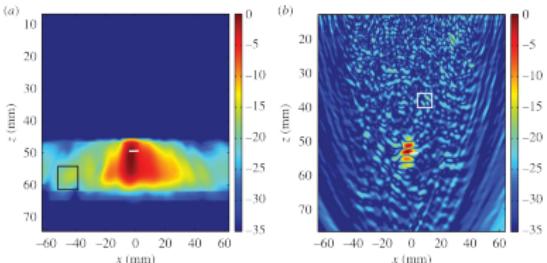


Image extraite de Chassaignole, 2010

Macrographie d'une soudure austénitique



Images extraites de Cunningham et al., Proc. R. Soc., 2016

Méthodes DORT (gauche) et FTP (droite)  
sur modèle EF de soudure anisotrope

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



✗ requièrent une connaissance *a priori* de la vitesse

✗ sujettes aux artefacts

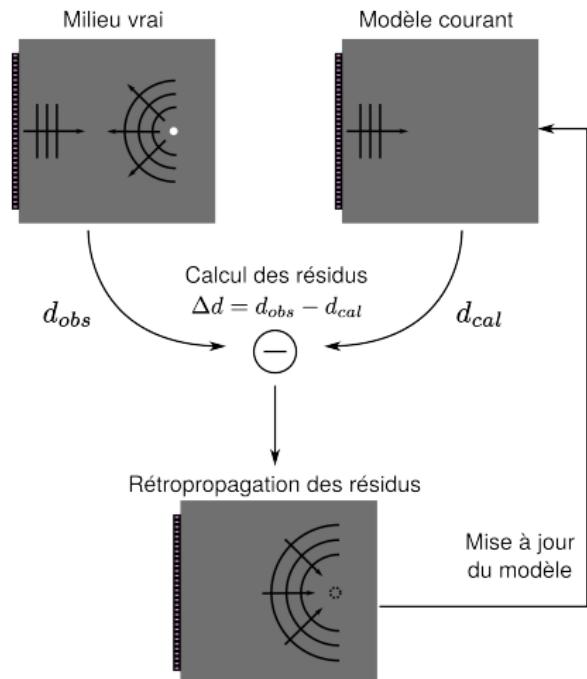


► optimisation topologique :  
*Dominguez et al., Rodriguez et al.*

✓ reconstruction d'un ensemble de paramètres : FWI

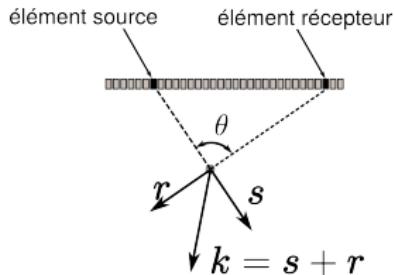
# La Full Waveform Inversion

- ▶ Développée pour la géophysique
- ▶ Estimation des paramètres élastiques  
    → optimisation locale
- ▶ Utilise tout le champ d'onde



# Résolution de la FWI

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



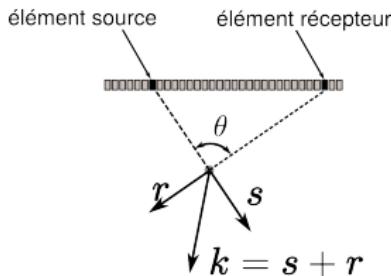
# Résolution de la FWI

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

► Résolution du gradient :

$$k = |\mathbf{s} + \mathbf{r}| = \frac{\omega}{c} 2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

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



# Résolution de la FWI

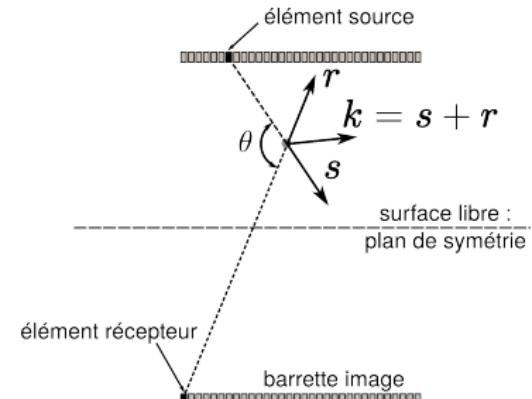
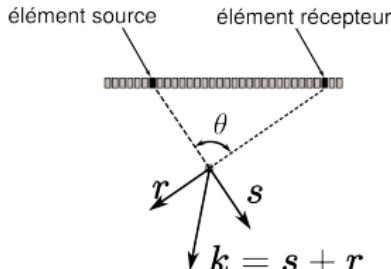
$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = \underbrace{\tilde{\mathbf{d}}_{cal}^t}_{\text{champ incident}} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\lambda}_{\text{résidus rétropagés}}$$

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

► Résolution du gradient :

$$k = |\mathbf{s} + \mathbf{r}| = \frac{\omega}{c} 2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

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



# Résolution de la FWI

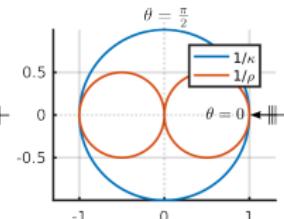
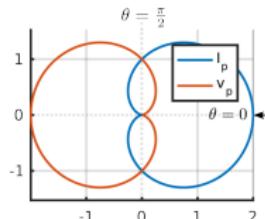
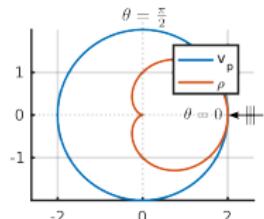
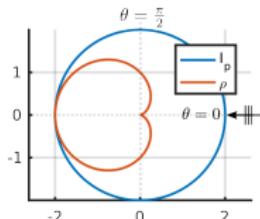
$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = \underbrace{\tilde{\mathbf{d}}_{cal}^t}_{\text{champ incident}} \boxed{\left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right)} \underbrace{\lambda}_{\text{résidus rétropagés}} \\ \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \quad \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{r} \cdot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

- Résolution du gradient :

$$k = |\mathbf{s} + \mathbf{r}| = \frac{\omega}{c} 2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

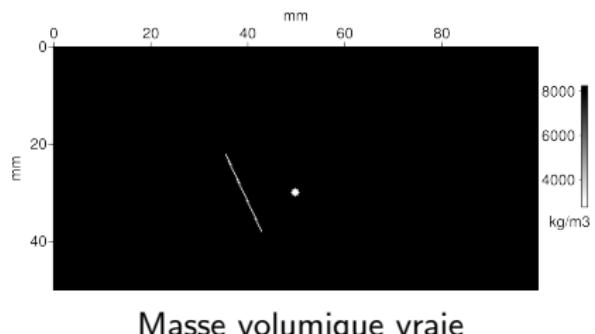
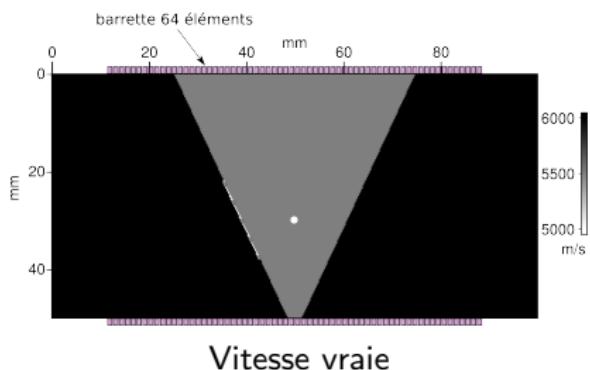
↪ maximale ( $\lambda/2$ ) en HF et pour  $\theta = 0$

- Rayonnement des paramètres :



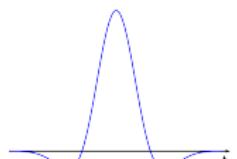
# Inversions en milieu isotrope

- Milieu 2D, isotrope, acoustique
- Paramétrisation : vitesse + masse volumique

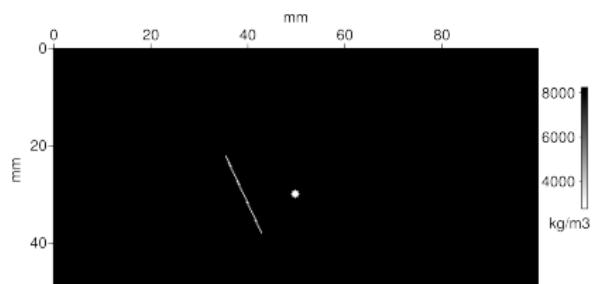
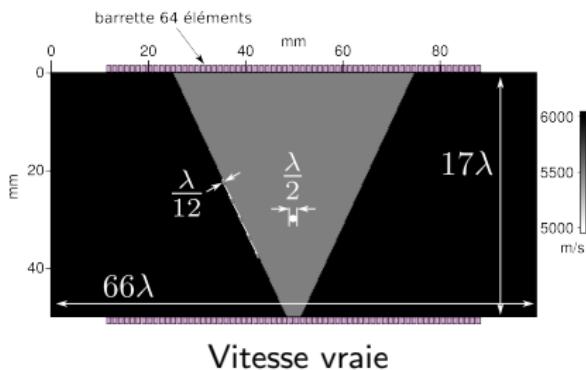


# Inversions en milieu isotrope

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



Ondelette de Ricker



Masse volumique vraie

## Stratégies d'inversion

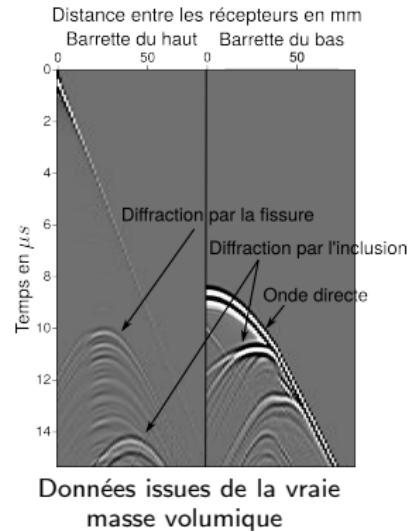
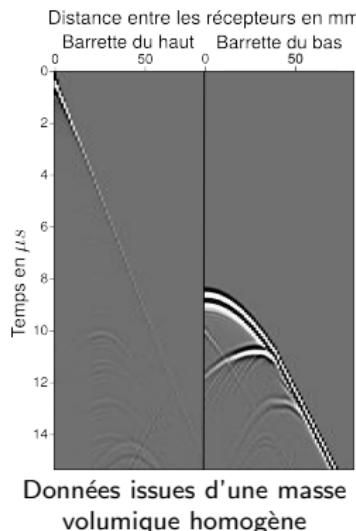
- ▶ pour mieux contraindre le problème
- ▶ pour lever les ambiguïtés de phase

# Stratégies d'inversion

- ▶ pour mieux contraindre le problème
- ▶ pour lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

- ▶ influence des paramètres sur les données

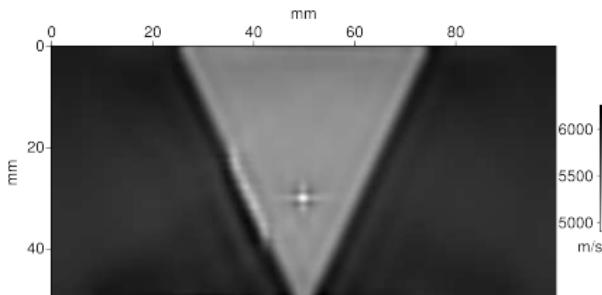


# Stratégies d'inversion

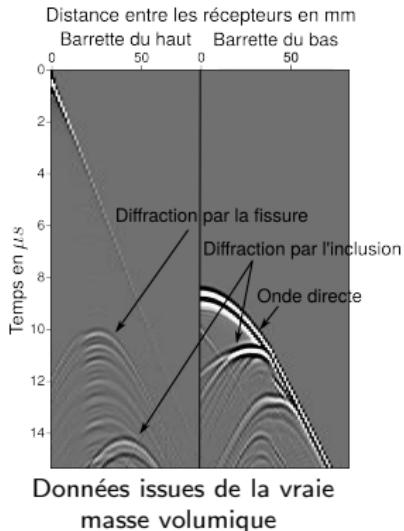
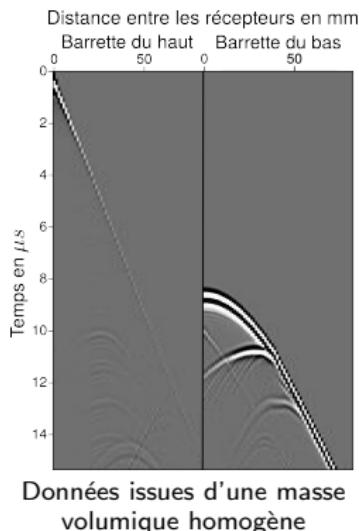
- ▶ pour mieux contraindre le problème
- ▶ pour lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

- ▶ influence des paramètres sur les données



Construction d'un modèle de vitesse lissé

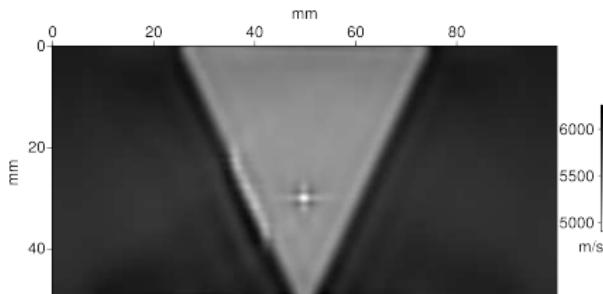
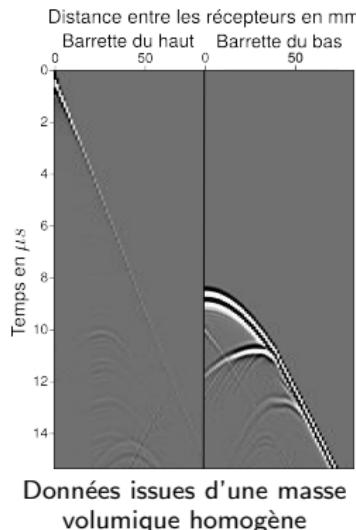


# Stratégies d'inversion

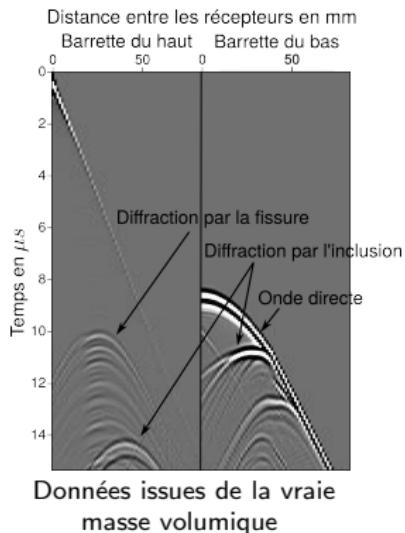
- ▶ pour mieux contraindre le problème
- ▶ pour lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

- ▶ influence des paramètres sur les données
- ▶ contenu fréquentiel



Construction d'un modèle de vitesse lissé

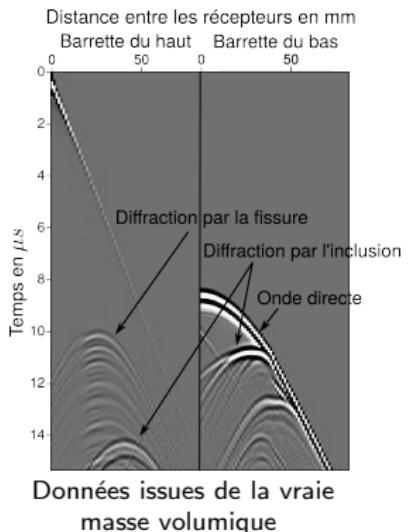
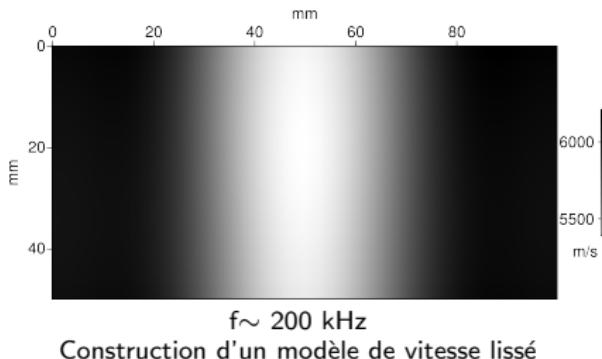
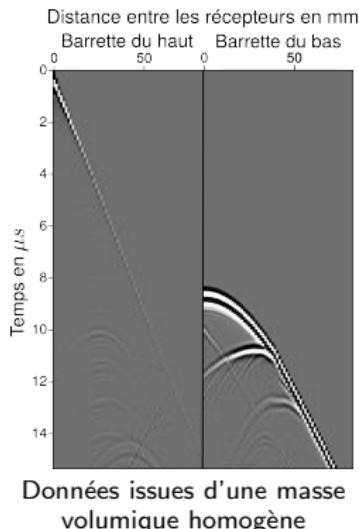


# Stratégies d'inversion

- ▶ pour mieux contraindre le problème
- ▶ pour lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

- ▶ influence des paramètres sur les données
- ▶ contenu fréquentiel

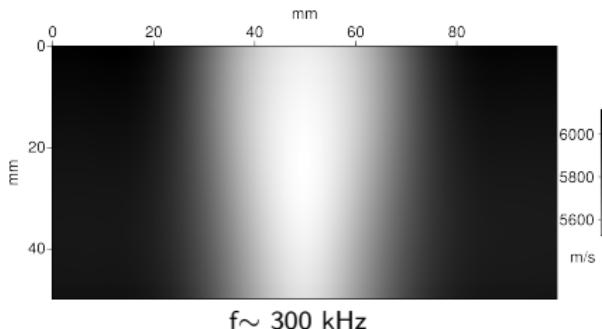
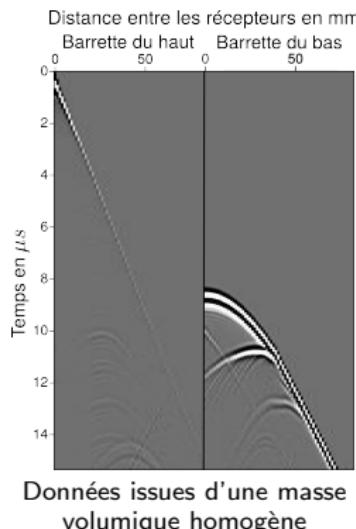


# Stratégies d'inversion

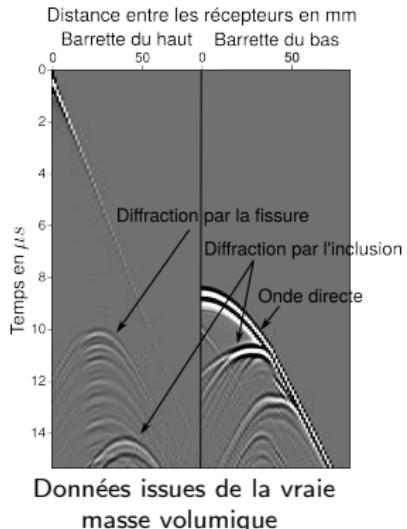
- ▶ pour mieux contraindre le problème
- ▶ pour lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

- ▶ influence des paramètres sur les données
- ▶ contenu fréquentiel



Construction d'un modèle de vitesse lissé

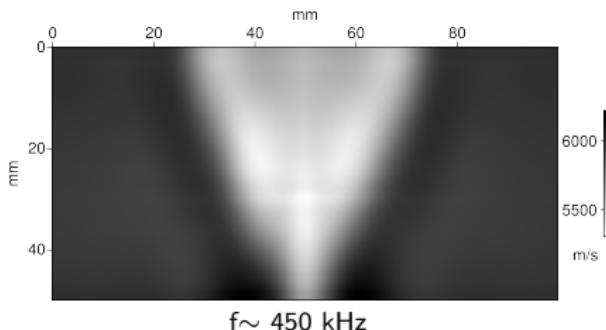
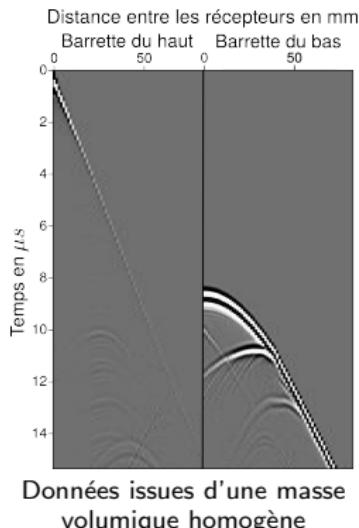


# Stratégies d'inversion

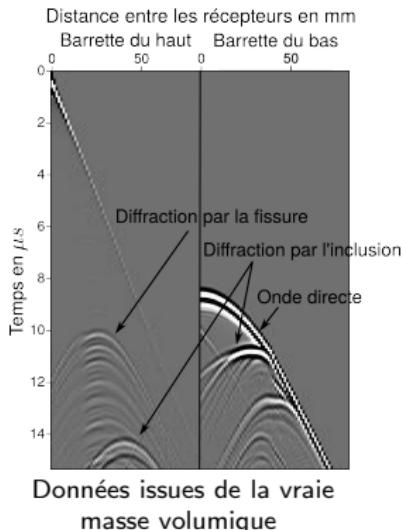
- ▶ pour mieux contraindre le problème
- ▶ pour lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

- ▶ influence des paramètres sur les données
- ▶ contenu fréquentiel



Construction d'un modèle de vitesse lissé

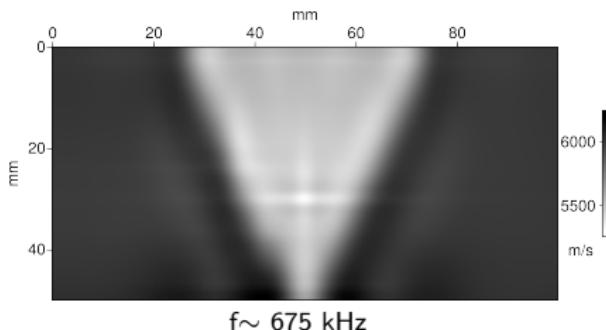
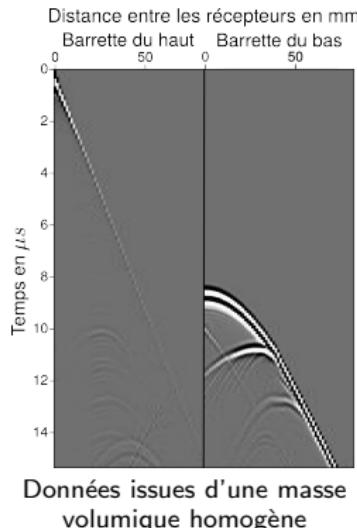


# Stratégies d'inversion

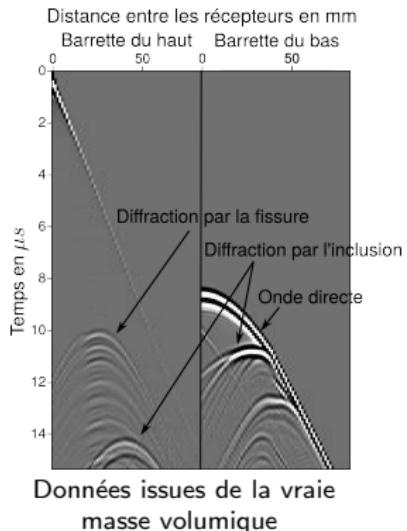
- ▶ pour mieux contraindre le problème
- ▶ pour lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

- ▶ influence des paramètres sur les données
- ▶ contenu fréquentiel



Construction d'un modèle de vitesse lissé

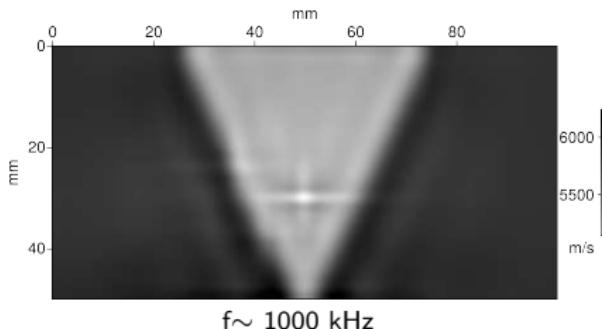
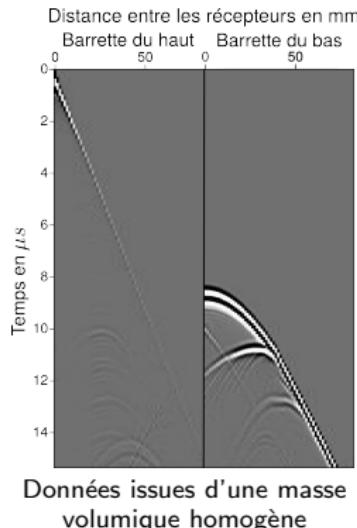


# Stratégies d'inversion

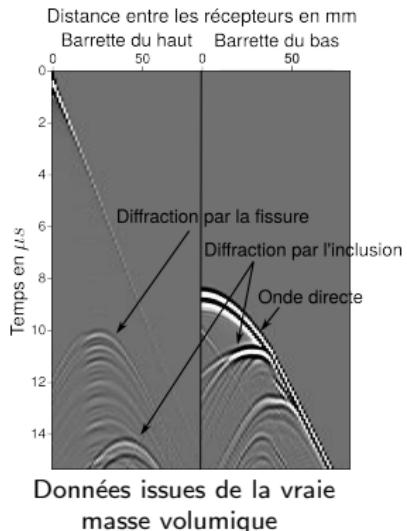
- ▶ pour mieux contraindre le problème
- ▶ pour lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

- ▶ influence des paramètres sur les données
- ▶ contenu fréquentiel



Construction d'un modèle de vitesse lissé

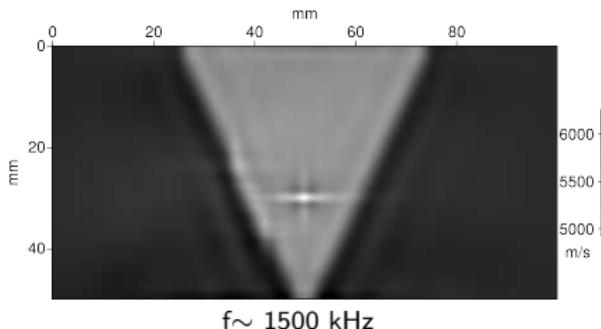
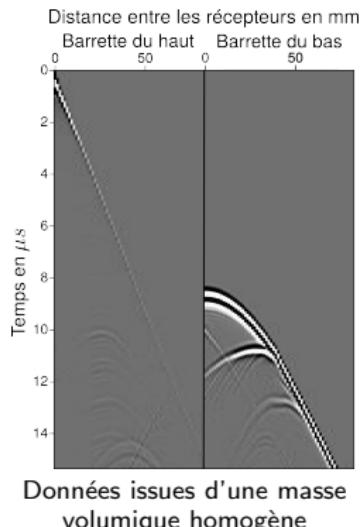


# Stratégies d'inversion

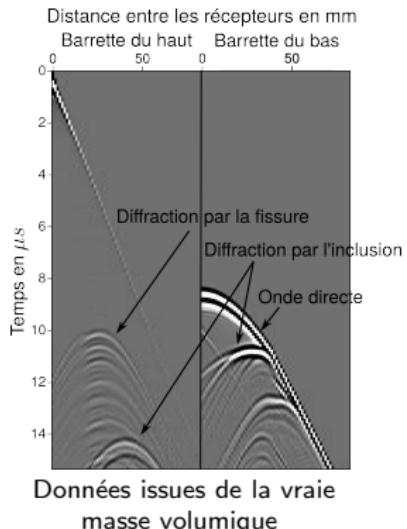
- ▶ pour mieux contraindre le problème
- ▶ pour lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

- ▶ influence des paramètres sur les données
- ▶ contenu fréquentiel



Construction d'un modèle de vitesse lissé

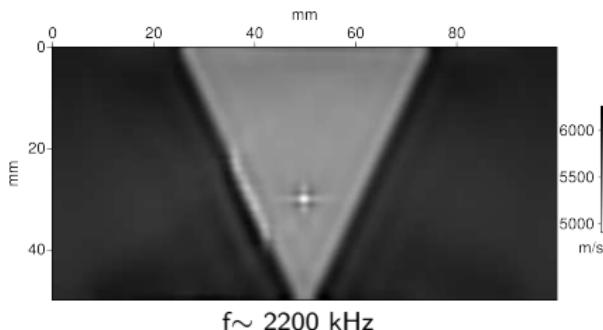
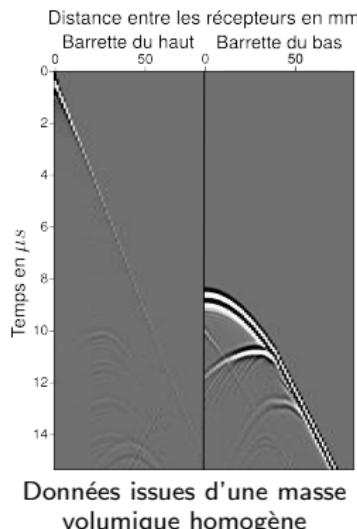


# Stratégies d'inversion

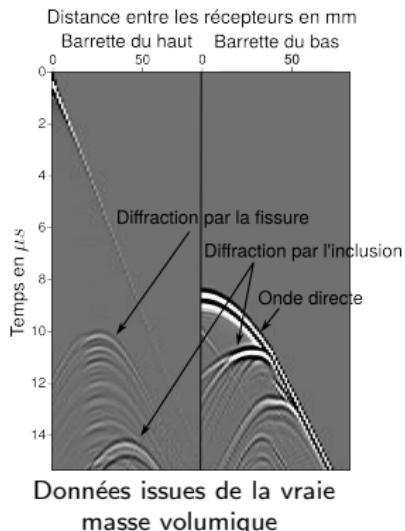
- ▶ pour mieux contraindre le problème
- ▶ pour lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

- ▶ influence des paramètres sur les données
- ▶ contenu fréquentiel

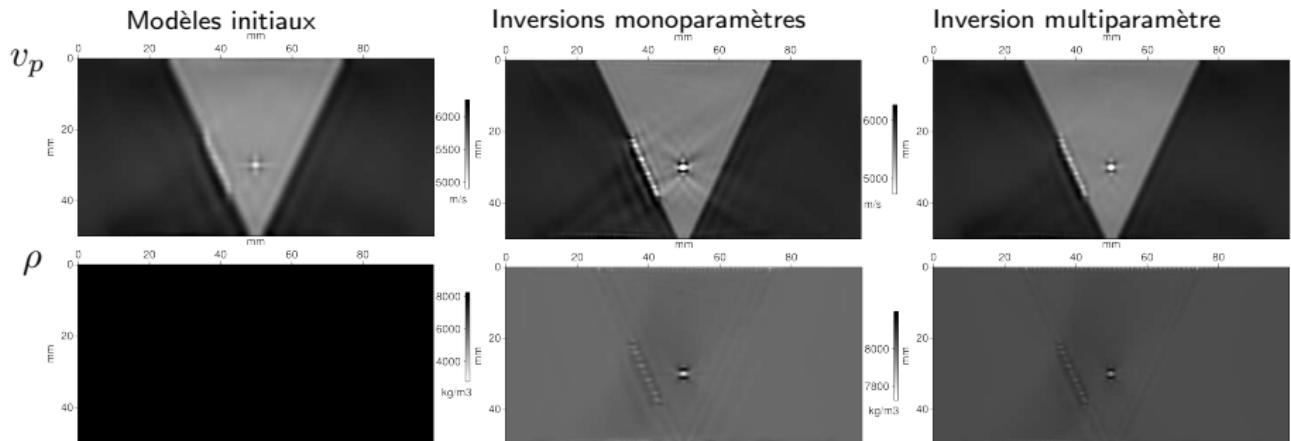


Construction d'un modèle de vitesse lissé



# Inversions en milieu isotrope

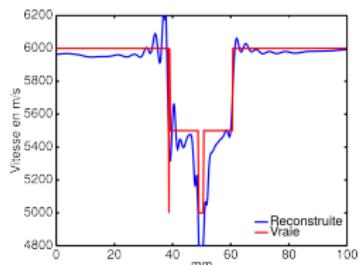
- ▶ 9 inversions successives de 200 kHz à 3 MHz



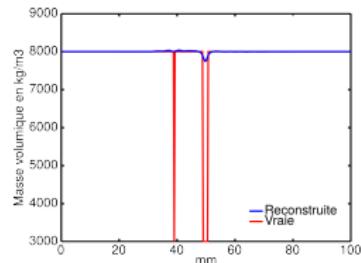
# Inversions en milieu isotrope

- Inversion monoparamètre :

Vitesse :

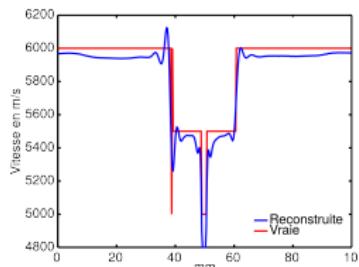


Masse volumique :

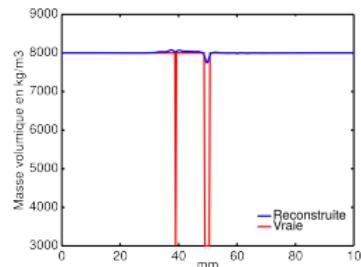


- Inversion multiparamètre :

Vitesse :



Masse volumique :

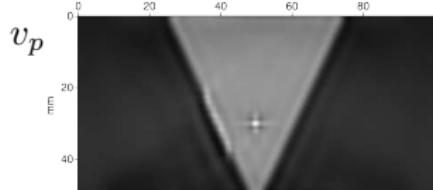


Coupes horizontales à 3 cm de profondeur

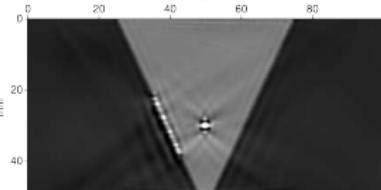
# Inversions en milieu isotrope

- ▶ 9 inversions successives de 200 kHz à 3 MHz

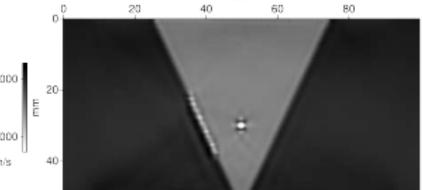
Modèles initiaux



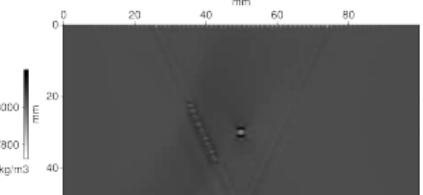
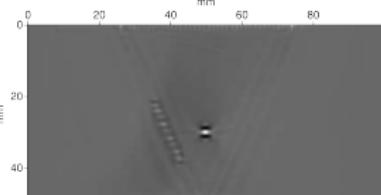
Inversions monoparamètres



Inversion multiparamètre

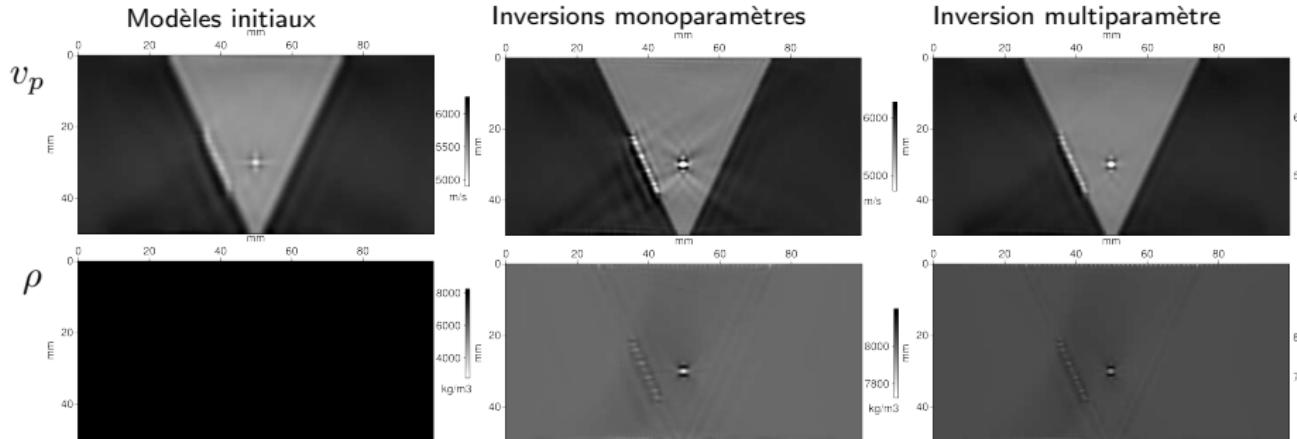


$\rho$



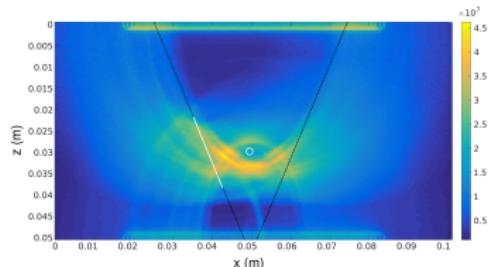
# Inversions en milieu isotrope

- ▶ 9 inversions successives de 200 kHz à 3 MHz



- ▶ Comparaison avec la méthode FTP

$$I(\mathbf{r}) = \sum_r \sum_e s_{r,e} (T_{\mathbf{rr}_r + T_{\mathbf{rr}_e}})$$

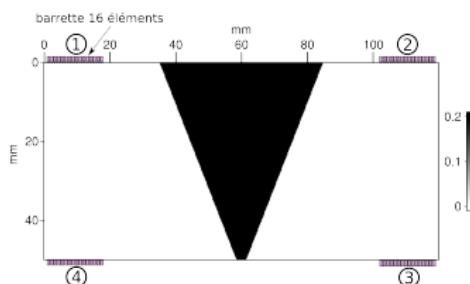


# Inversions en milieu anisotrope

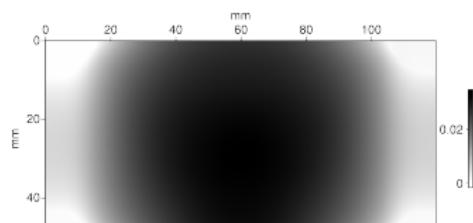
- ▶ Milieu acoustique, isotrope transverse (axe de symétrie horizontal)
- ▶ Paramètre d'anisotropie :

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

$\epsilon$  vrai :



$\epsilon$  reconstruit :



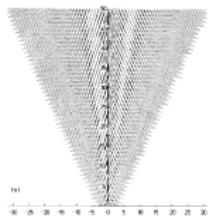
- ▶ Trajets horizontaux porteurs d'information :  $\theta = \pi \rightarrow k \sim 0$
- ▶ Modèle peu représentatif

## Conclusions et perspectives

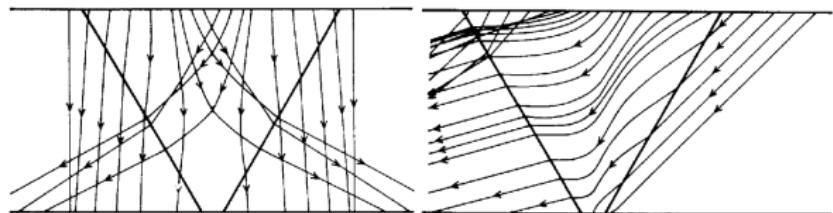
- ▶ Inversion multiparamètre : corrige les artefacts

# 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  $6 \times C_{ij}$



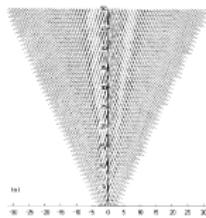
(a) Modèle d'orientation des grains



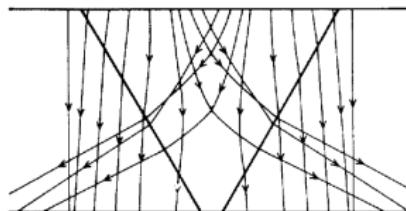
(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

# Conclusions et perspectives

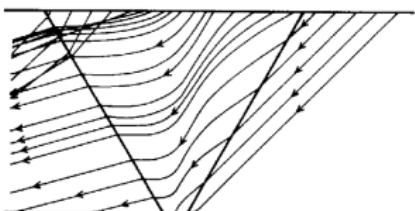
- ▶ Inversion multiparamètre : corrige les artefacts
- ▶ Prise en compte de l'anisotropie :
  - ▶ en acoustique : par un modèle isotrope transverse incliné
  - ▶ en élastique : par  $6 \times C_{ij}$



(a) Modèle d'orientation des grains



Images extraits de Ogilvy, 1986

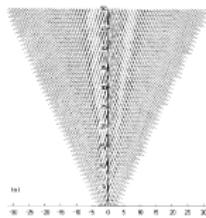


(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

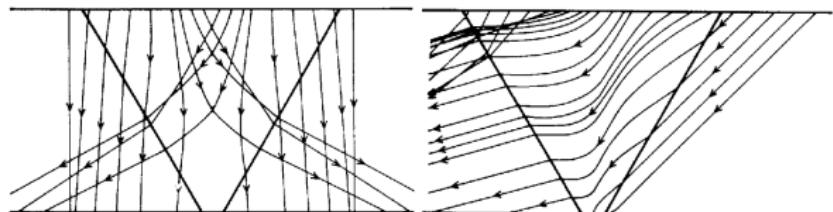
- ▶ Élaboration d'un modèle initial fiable

# 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  $6 \times C_{ij}$



(a) Modèle d'orientation des grains

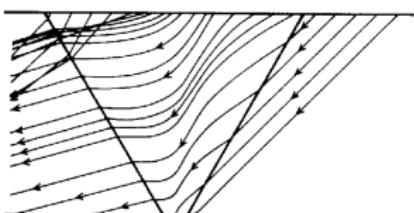
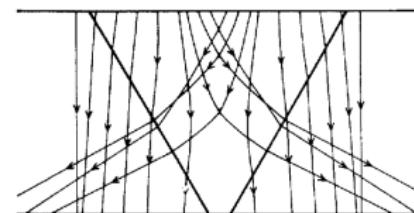
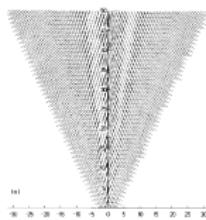


(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

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

# 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

(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

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

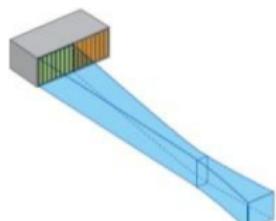
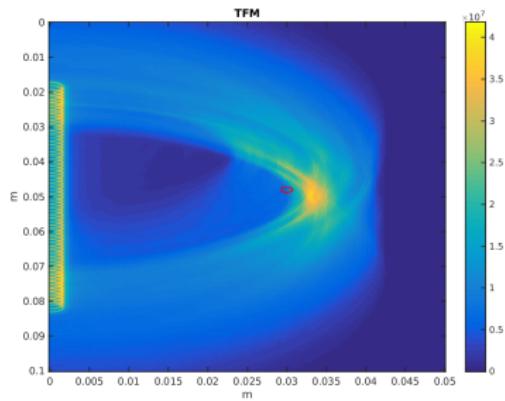


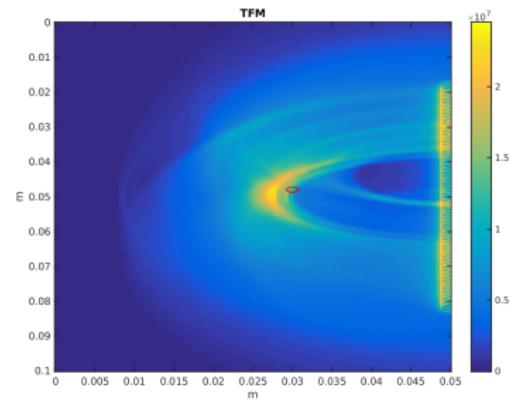
Image Olympus

## ANNEXES

# TFM



Barrette du haut



Barrette du bas