

**Alice Dinsenmeyer**  
Doctorante (1<sup>ère</sup> année)

*alice.dinsenmeyer@insa-lyon.fr  
1<sup>er</sup> étage, Bât. J. Jacquard*

Licence et master acoustique du Mans (2011-2016)

- Ondes      - Traitement du signal      - Méthodes numériques
- Imagerie US      - Psychoacoustique

## **Méthodes inverses par approche bayésienne pour l'identification de sources aéroacoustique**

depuis juillet 2017

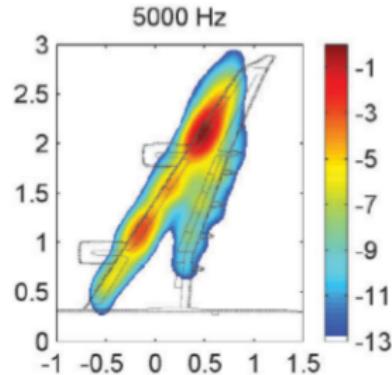
Direction : Jérôme Antoni (LVA), Christophe Bailly (LMFA), Quentin Leclère (LVA)

Financements : CeLyA + INSAVALOR (projet européen **ADvanced Aeroacoustic Processing Techniques, ADAPT**)

Collaborations : LVA, LMFA, MicrodB, PSA3, Airbus

# Contexte

- ▶ Réduction du bruit des avions :  
aérodynamique et turbomachines  
(conception et validation)
  - ↪ fluctuation de pression acoustique et  
aérodynamique
  - ↪ large bande fréquentielle
- ▶ Méthodes actuelles : formation de voies &  
déconvolution
  - Avantages : flexible, simple et rapide
  - Limites : connaissance du modèle de sources, sources corrélées,  
niveaux



# Axes de la thèse

1. Débruitage des mesures :  $S_{pp} = S_{acoustique} + S_{turbulence}$ 
  - ▶ Approche probabiliste
  - ▶ Connaissances a priori : physique des sources (expériences, modèle numérique/analytique)
  - ▶ Critères de qualité ?
2. Localisation des sources
  - ▶ Approche bayésienne
  - ▶ Contraindre l'inversion : physique des sources
  - ▶ Critère de qualité ? (qualitatif et quantitatif)

# Imagerie ultrasonore de soudures par inversion de formes d'onde

Alice DINSENMEYER

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

mars-juillet 2016



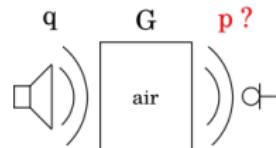
# Institut des sciences de la Terre, Grenoble

- ▶ 280 personnes, dont 108 chercheurs et 80 doctorants (2016)
- ▶ Géochimie (géologie, minéralogie)
- ▶ Géophysique (mécanique, ondes, tectonique, cycle sismique, magnétisme)
- ▶ Risque et environnement

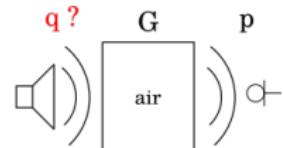


# Imagerie US vs localisation de sources

## ► Localisation de sources acoustiques



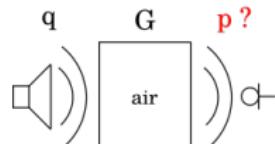
Problème direct



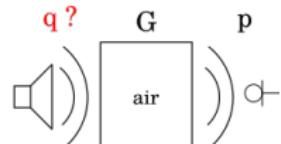
Problème inverse

# Imagerie US vs localisation de sources

## ► Localisation de sources acoustiques

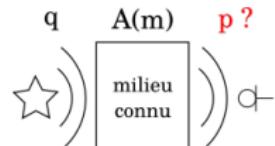


Problème direct

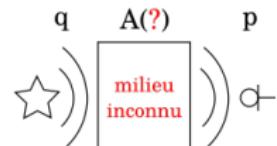


Problème inverse

## ► Imagerie par ultrasons



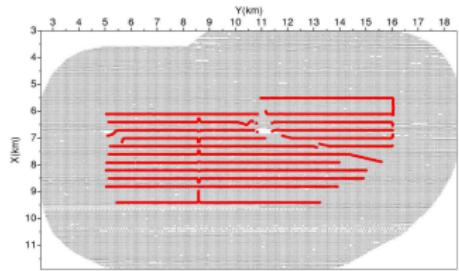
Problème direct



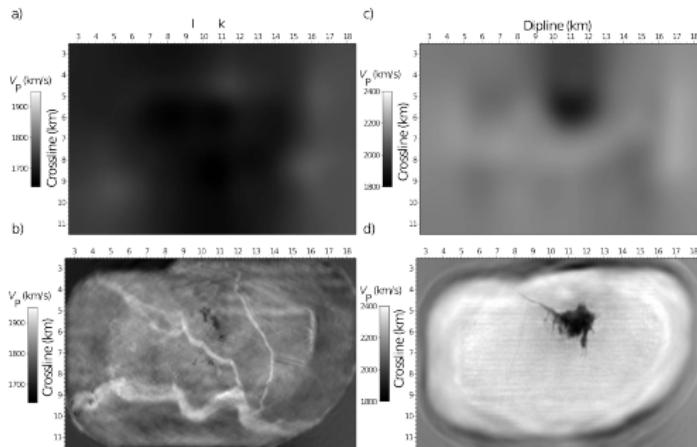
Problème inverse

# Projet Seiscope

- $\approx 20$  personnes à ISTerre
- Sponsors : industrie du gaz et pétrole



Acquisition à Valhall, Sirgue et al. 2009  
120 km de câbles, 2414 hydrophones  
50000 excitations par canon à air ( $45 \text{ km}^2$ )



Profondeur : 150 m      Profondeur : 1050 m  
En haut : tomographie des temps en réflexion  
En bas : Inversion de forme d'ondes

# Contexte



Image Davidmack

Contrôle sur pipeline

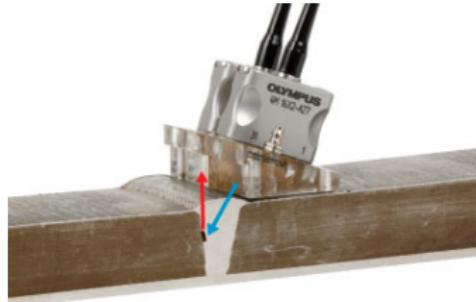


Image Olympus

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, . . .

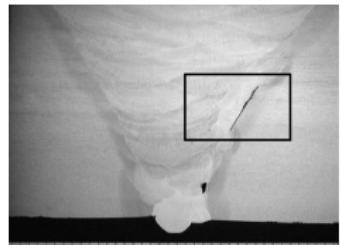
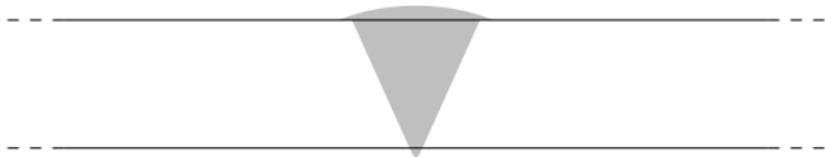


Image extraite de Consonni et al.,  
Insight, 2011

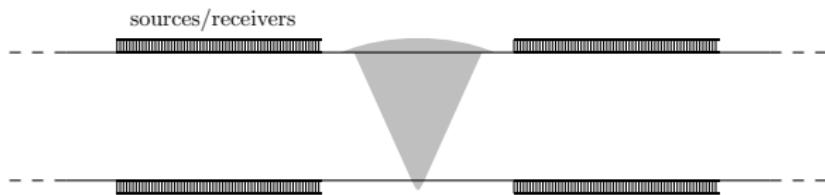
## Spécificité de l'imagerie de soudure

- ▶ 2 surfaces libres : réflexions multiples ↔ problème mal posé



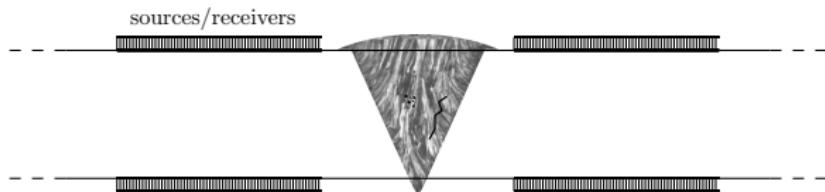
# Spécificité de l'imagerie de soudure

- ▶ 2 surfaces libres : réflexions multiples ↔ problème mal posé
- ▶ Acquisition de surface : limitation de la résolution

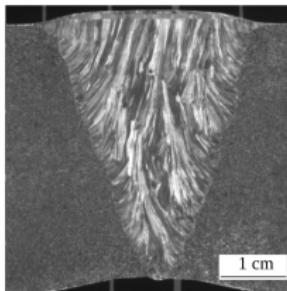


# Spécificité de l'imagerie de soudure

- ▶ 2 surfaces libres : réflexions multiples ↔ problème mal posé
- ▶ Acquisition de surface : limitation de la résolution
- ▶ Anisotropie → inversion multiparamétrique  
 $(C_{ij} \times 6 : \text{soudure} + \text{défaut})$



# 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

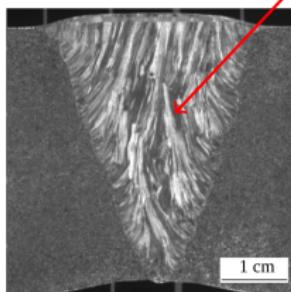
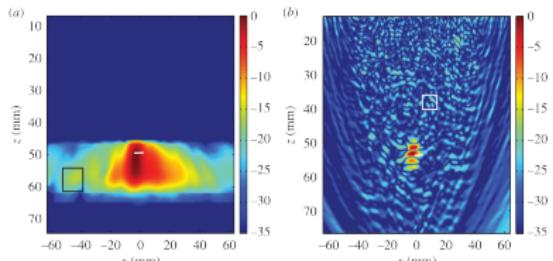


Image extraite de Chassignole, 2010

Macrographie d'une soudure austénitique



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

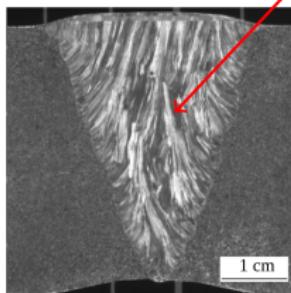
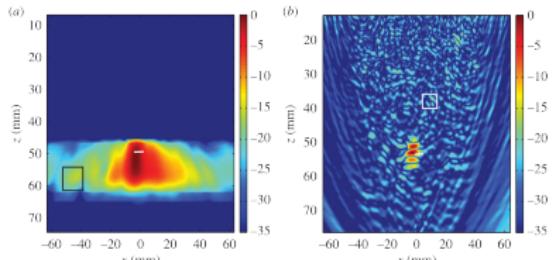


Image extraite de Chassignole, 2010

Macrographie d'une soudure austénitique



Cunningham et al., Proc. R. Soc., 2016

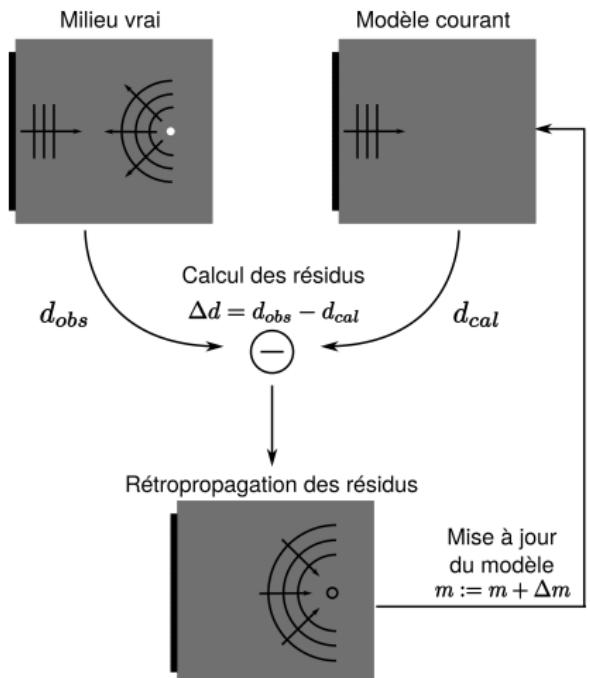
Méthodes DORT (gauche) et FTP (droite)  
sur modèle EF de soudure anisotrope

- 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
- 
- ✓ reconstruction d'un ensemble de paramètres : FWI

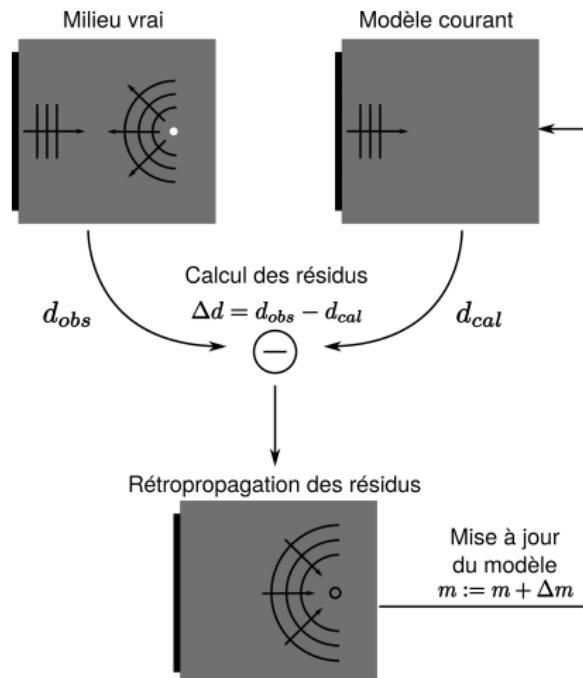
# Full Waveform Inversion



# Full Waveform Inversion

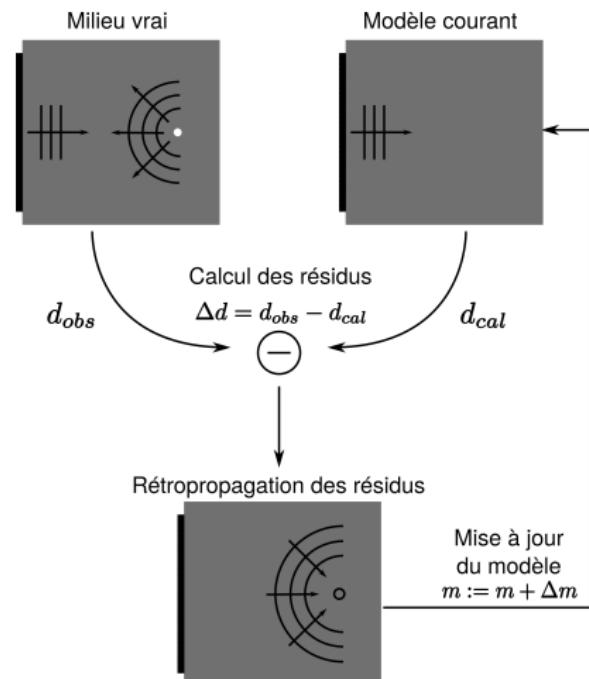
- ▶ Fonction de coût :

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



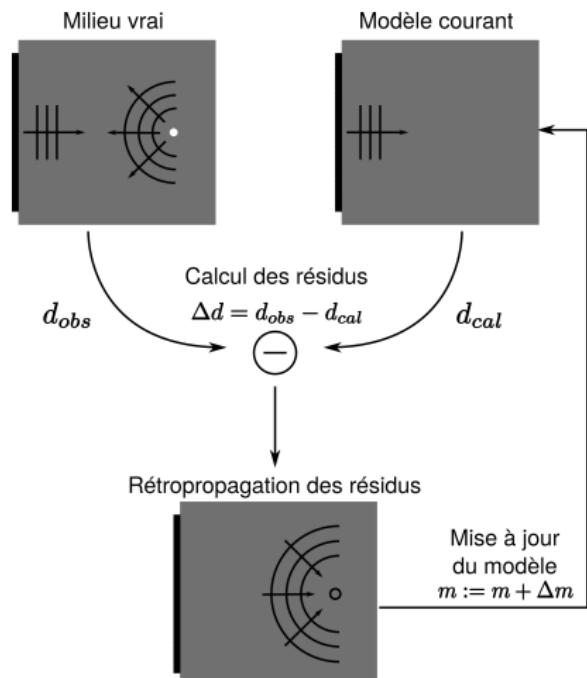
# Full Waveform Inversion

- ▶ Fonction de coût :  
$$C(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})\|^2$$
- ▶ Optimisation locale : modèle optimal quand  $C'(\mathbf{m} + \Delta\mathbf{m}) = 0$



# Full Waveform Inversion

- ▶ Fonction de coût :  
$$C(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})\|^2$$
- ▶ Optimisation locale : modèle optimal quand  $C'(\mathbf{m} + \Delta\mathbf{m}) = 0$
- ▶ Perturbation du modèle :  
$$\Delta\mathbf{m} = -(C'')^{-1} C'$$
  
 $C''$  : approx. à partir de  $C'$  (L-BFGS)  
 $C'$  : ?



## Calcul du gradient

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

## Calcul du gradient

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

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

## Calcul du gradient

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

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

$$C' = {}^t \mathbf{d}_{cal} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\mathbf{A}^{-1} (\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal})}_{\text{résidus rétropagés}}$$

# Calcul du gradient

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

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

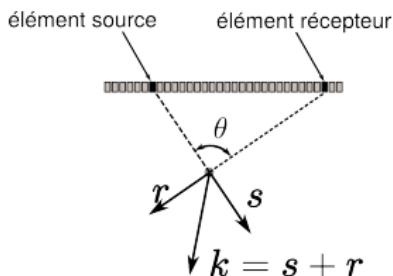
$$C' = {}^t \mathbf{d}_{cal} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\mathbf{A}^{-1} (\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal})}_{\text{résidus rétropagés}}$$

**Le gradient découle du calcul de 2 problèmes directs :**

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

# Résolution de la FWI

$$C' = \underbrace{{}^t \mathbf{d}_{cal}}_{\text{champ incident}} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\lambda}_{\text{résidus rétropagés}}$$
$$\sim \Re(e^{j k_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \quad \sim \Re(e^{j k_0 \mathbf{r} \cdot \mathbf{x}})$$



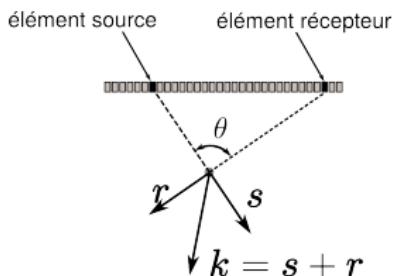
# Résolution de la FWI

$$C' = \underbrace{{}^t \mathbf{d}_{cal}}_{\text{champ incident}} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\lambda}_{\text{résidus rétropagés}} \\ \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \quad \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{r} \cdot \mathbf{x}})$$

► Résolution du gradient :

$$k = k_0 |\mathbf{s} + \mathbf{r}| = \frac{\omega}{c} 2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

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



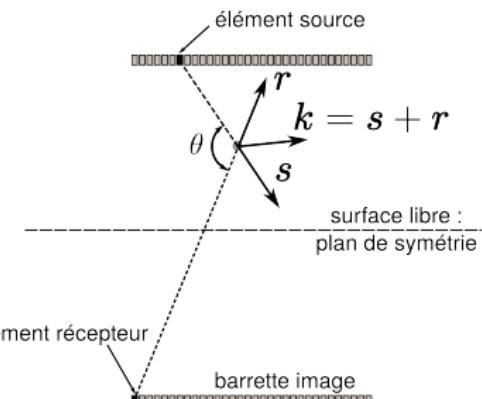
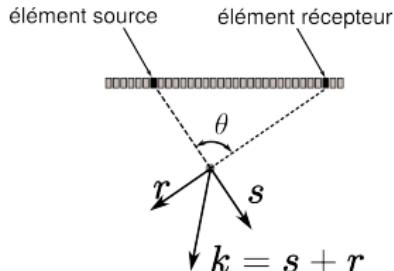
# Résolution de la FWI

$$C' = \underbrace{{}^t \mathbf{d}_{cal}}_{\text{champ incident}} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\lambda}_{\text{résidus rétropagés}} \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{r} \cdot \mathbf{x}})$$

► Résolution du gradient :

$$k = k_0 |\mathbf{s} + \mathbf{r}| = \frac{\omega}{c} 2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

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



# Résolution de la FWI

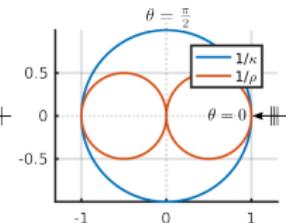
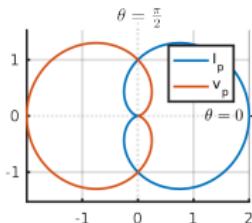
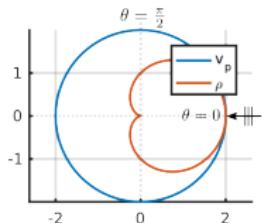
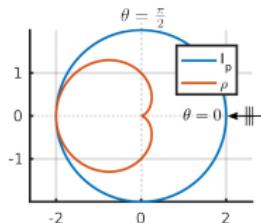
$$C' = \underbrace{\mathbf{d}_{cal}^t}_{\text{champ incident}} \boxed{\left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right)} \underbrace{\lambda}_{\text{résidus rétropagés}} \\ \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \quad \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{r} \cdot \mathbf{x}})$$

- Résolution du gradient :

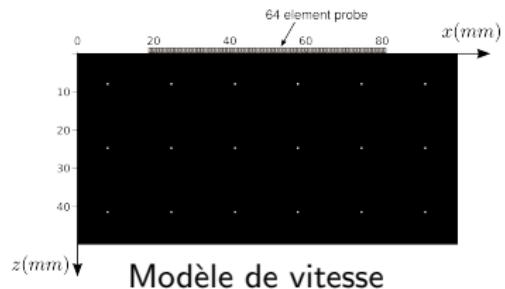
$$k = k_0 |\mathbf{s} + \mathbf{r}| = \frac{\omega}{c} 2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

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

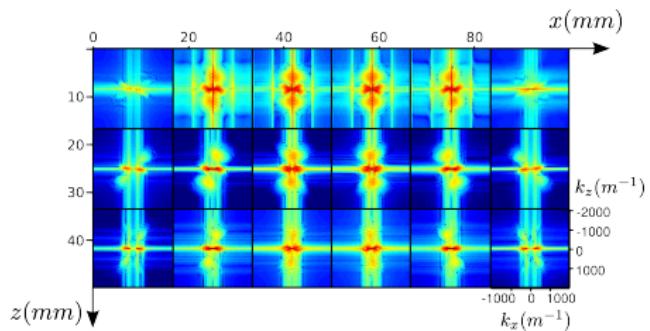
- Rayonnement des paramètres :



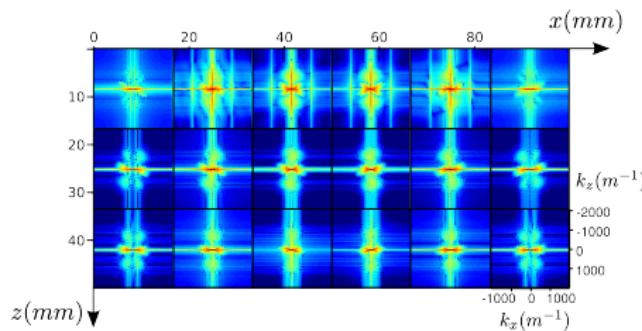
# Résolution de la FWI



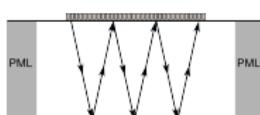
Modèle de vitesse



Pour 1 réflexion

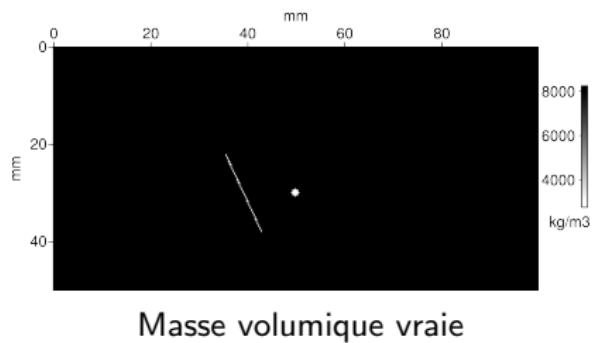
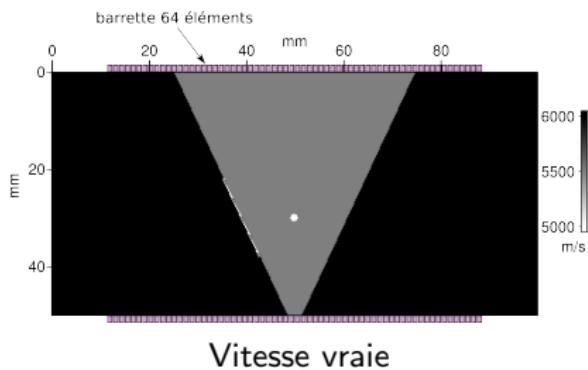


Pour 5 réflexions



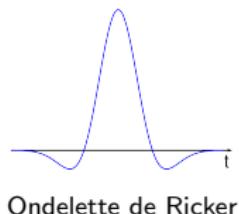
# Inversions en milieu isotrope

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

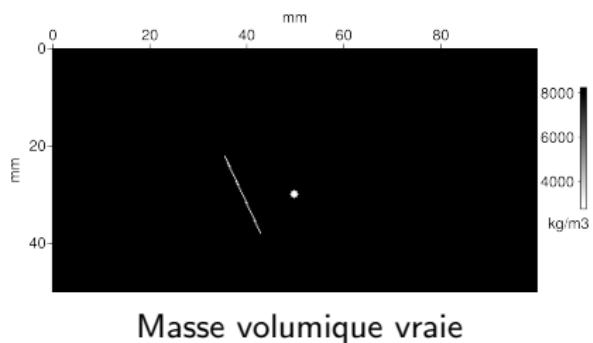
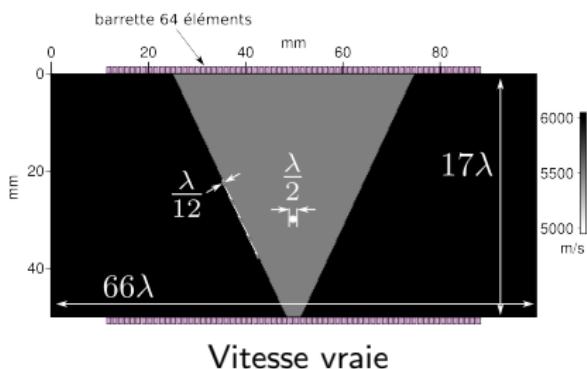


# Inversions en milieu isotrope

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



Ondelette de Ricker



## Stratégies d'inversion

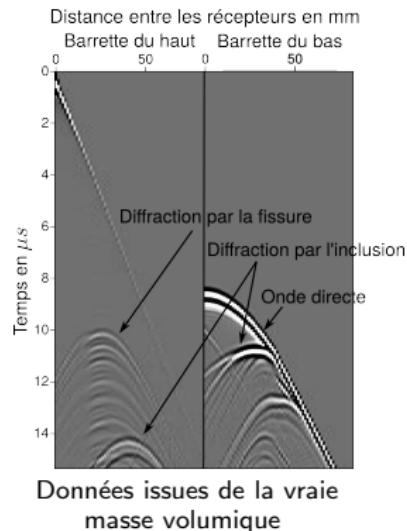
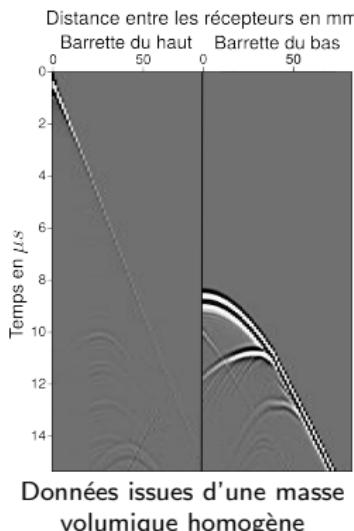
- ▶ pour contraindre le problème, lever les ambiguïtés de phase

# Stratégies d'inversion

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

2 critères hiérarchiques :

- ▶ influence des paramètres sur les données

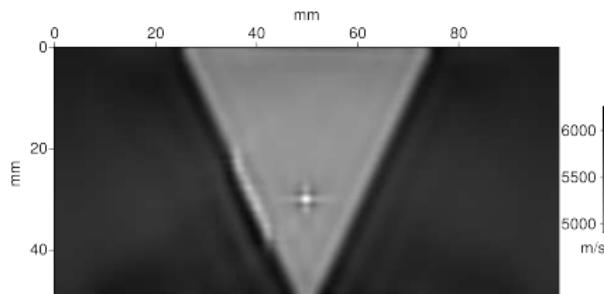


# Stratégies d'inversion

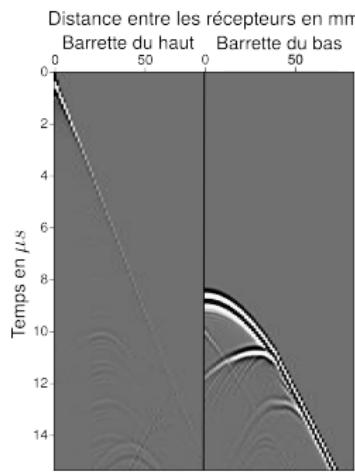
- pour contraindre le problème, lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

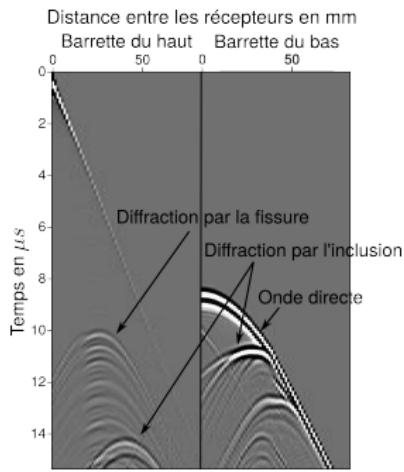
- influence des paramètres sur les données



Construction d'un modèle de vitesse lissé



Données issues d'une masse volumique homogène



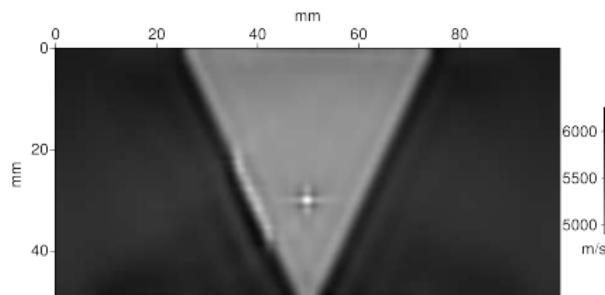
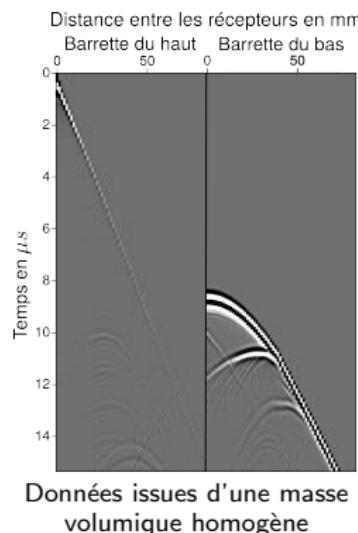
Données issues de la vraie masse volumique

# Stratégies d'inversion

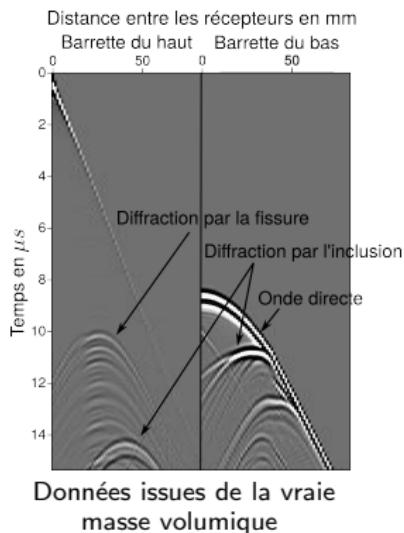
- ▶ pour contraindre le problème, lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

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



Construction d'un modèle de vitesse lissé

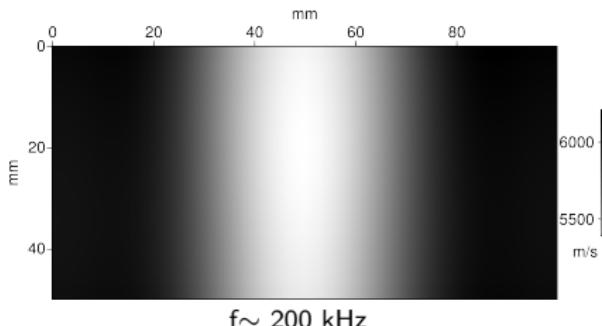
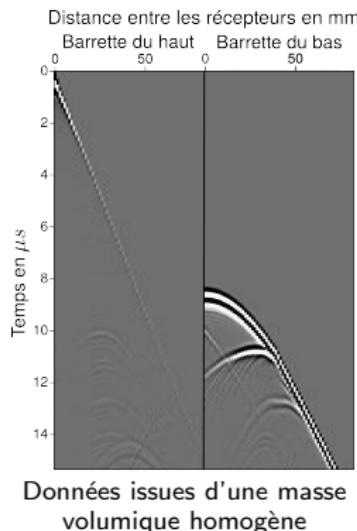


# Stratégies d'inversion

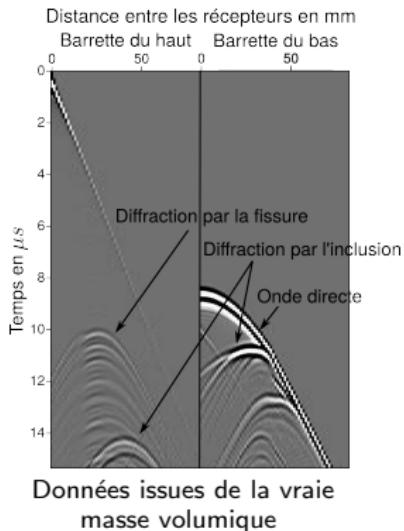
- ▶ pour contraindre le problème, lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

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



Construction d'un modèle de vitesse lissé

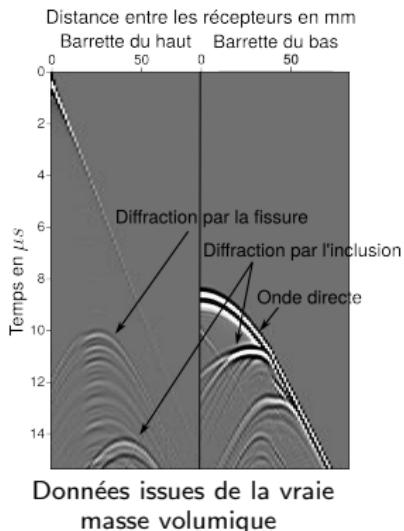
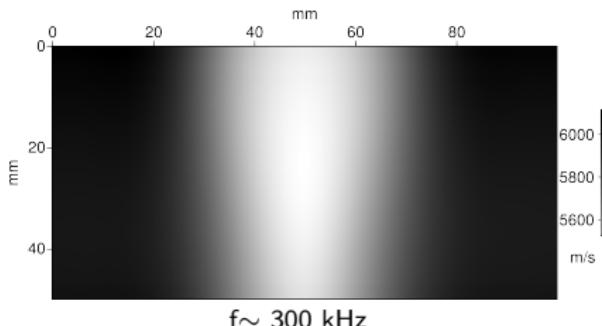
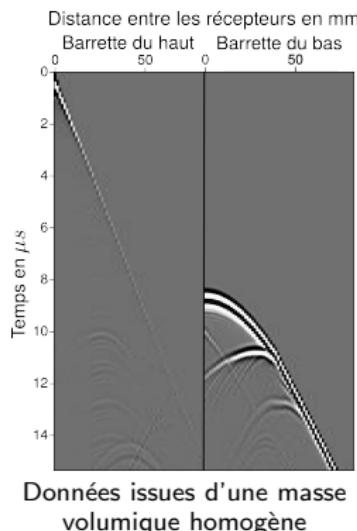


# Stratégies d'inversion

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

2 critères hiérarchiques :

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

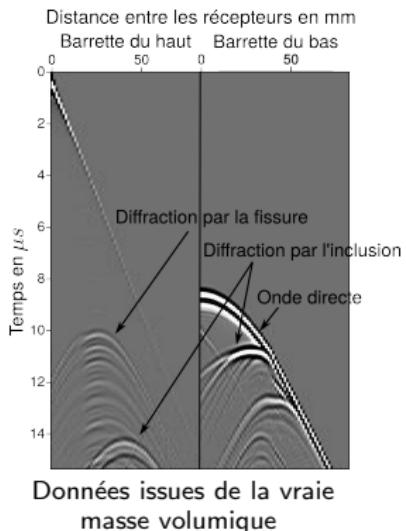
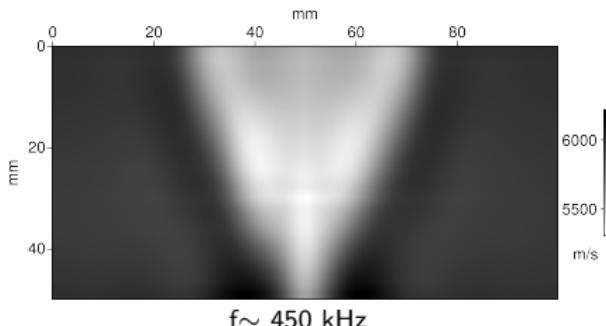
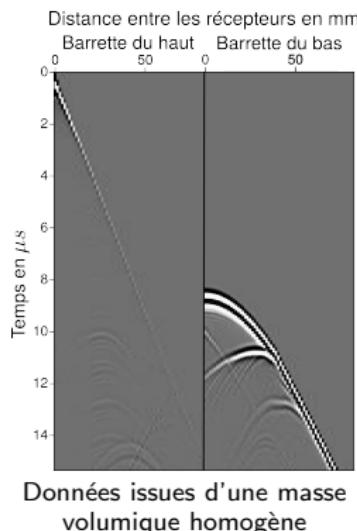


# Stratégies d'inversion

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

2 critères hiérarchiques :

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

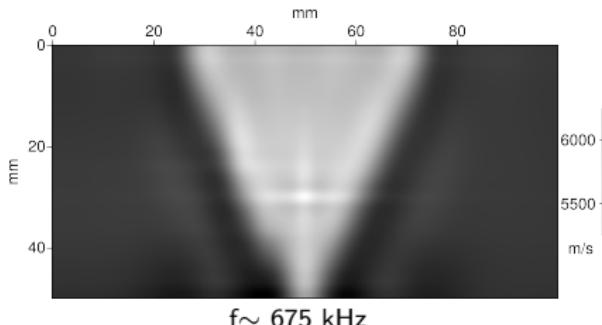
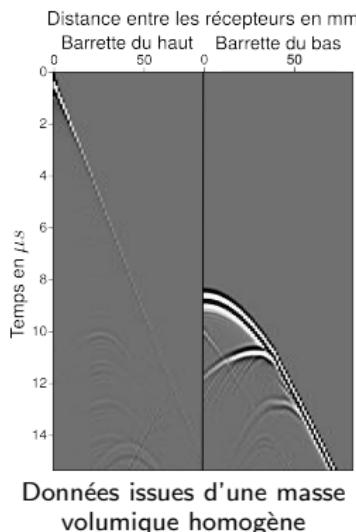


# Stratégies d'inversion

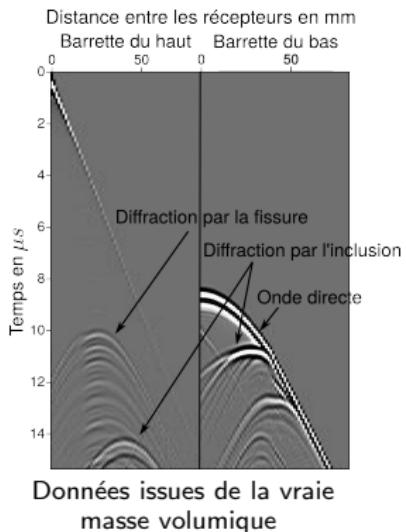
- ▶ pour contraindre le problème, lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

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



Construction d'un modèle de vitesse lissé

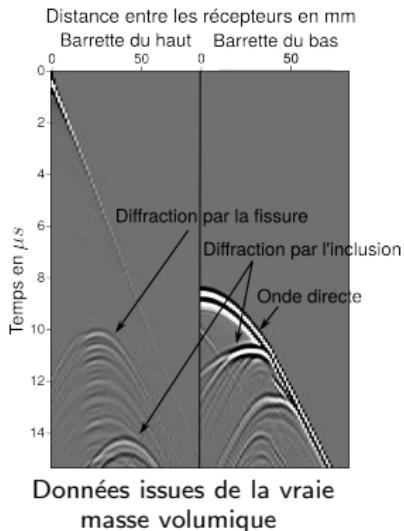
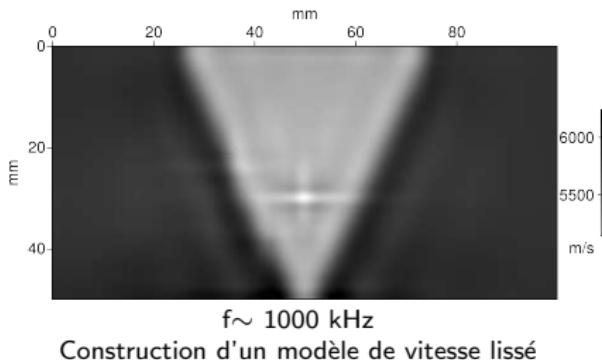
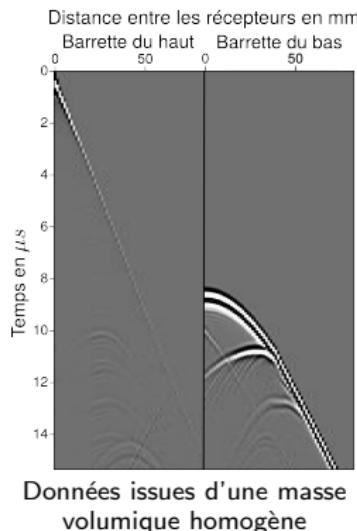


# Stratégies d'inversion

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

2 critères hiérarchiques :

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

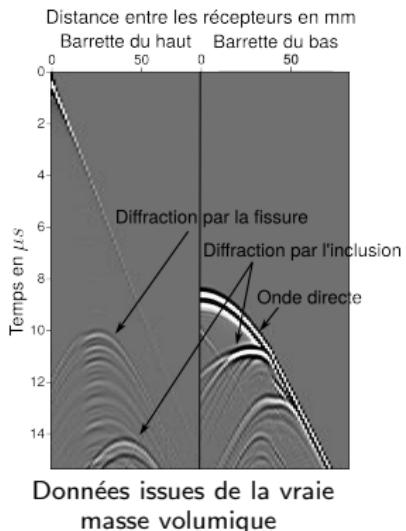
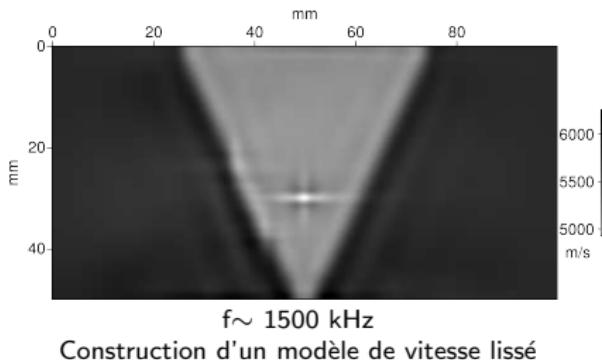
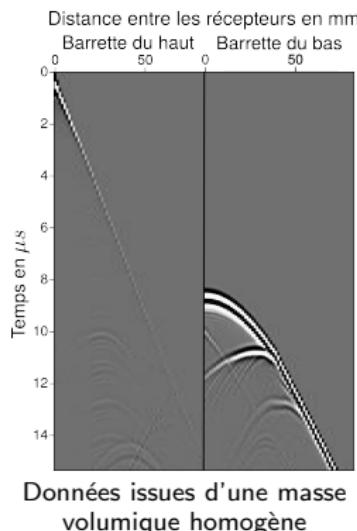


# Stratégies d'inversion

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

2 critères hiérarchiques :

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

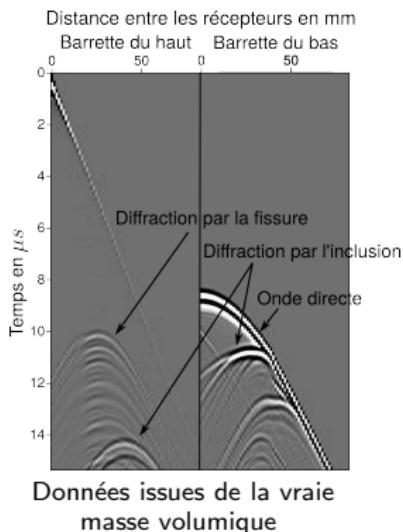
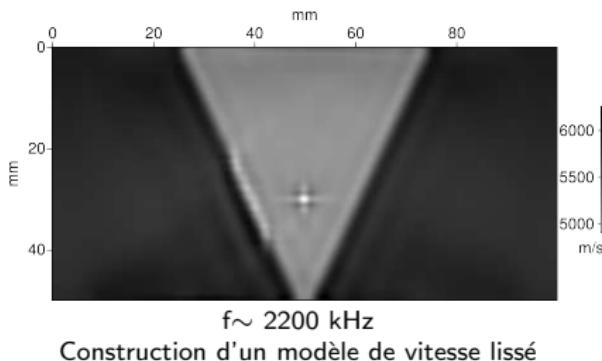
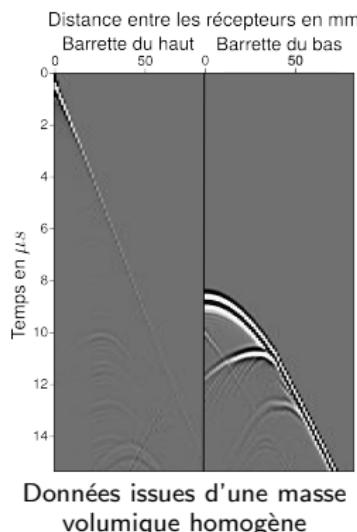


# Stratégies d'inversion

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

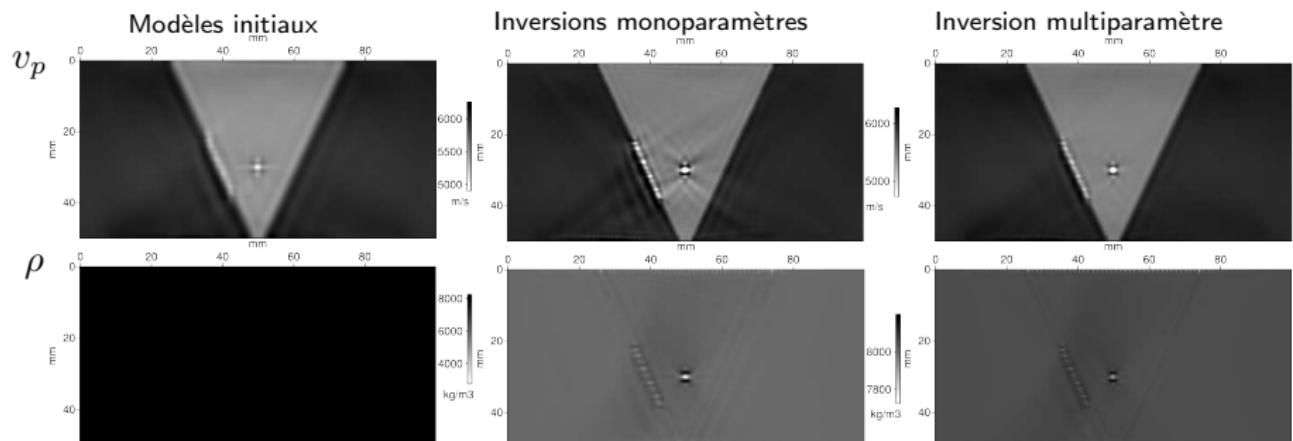
2 critères hiérarchiques :

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



# Inversions en milieu isotrope

- ▶ 9 inversions successives de 200 kHz à 3 MHz



## Conclusion

- ▶ Inversion multiparamètre : corrige les artefacts

# Conclusion

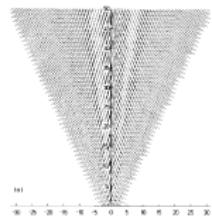
- ▶ Inversion multiparamètre : corrige les artefacts
- ▶ Régularisation empirique hiérarchique :
  - ▶ Gamme fréquentielle
  - ▶ Paramétrisation
  - ▶ Sources et récepteurs
  - ▶ Filtrage temporel

# Conclusion

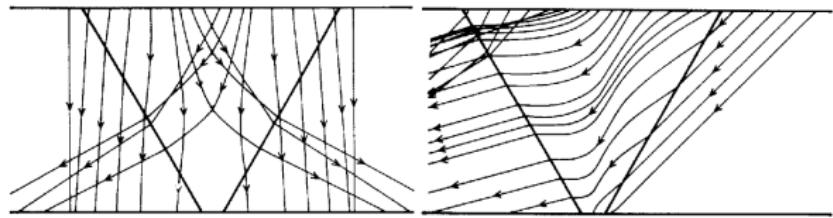
- ▶ Inversion multiparamètre : corrige les artefacts
- ▶ Régularisation empirique hiérarchique :
  - ▶ Gamme fréquentielle
  - ▶ Paramétrisation
  - ▶ Sources et récepteurs
  - ▶ Filtrage temporel
- ▶ Temps de calcul (2D) :  
9 fréq. × 20 perturbations = 180 inversions  
5 min/inversion → 15h  
VS beamforming : 10 min sur pc

# Perspectives

- ▶ Prise en compte de l'anisotropie, 3D :  $6 \times C_{ij}$



(a) Modèle d'orientation des grains

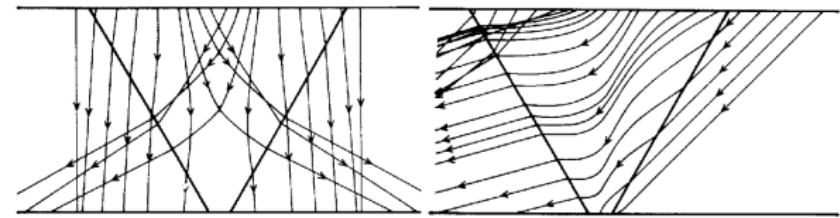
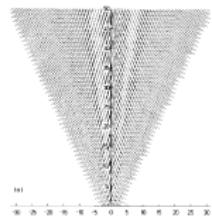


Images extraites de Ogilvy, 1986

(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

# Perspectives

- ▶ Prise en compte de l'anisotropie, 3D :  $6 \times C_{ij}$



Images extraites de Ogilvy, 1986

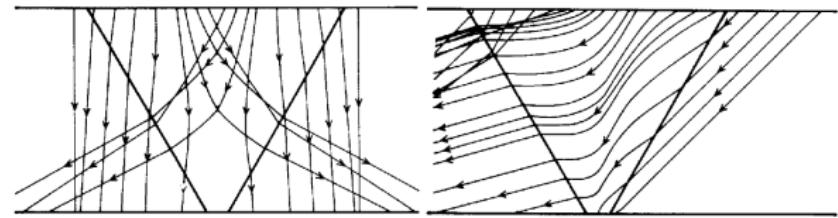
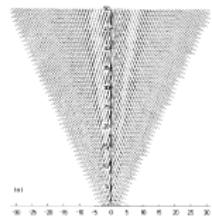
(a) Modèle d'orientation des grains

(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

- ▶ Élaboration d'un modèle initial fiable

# Perspectives

- ▶ Prise en compte de l'anisotropie, 3D :  $6 \times C_{ij}$



Images extraites de Ogilvy, 1986

(a) Modèle d'orientation des grains

(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

- ▶ Élaboration d'un modèle initial fiable
- ▶ Application à des données expérimentales

Codes ouverts (FORTRAN 90) : <http://seiscope2.osug.fr>  
↪ optimization toolbox + codes pb direct/inverse

Transport optimal (norme de Kantorovich-Rubinstein), Métivier 2016  
Prior informations, Asnaashari 2013