

Alice Dinsenmeyer
Doctorante (1^{ère} année)

*alice.dinsenmeyer@insa-lyon.fr
1^{er} 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

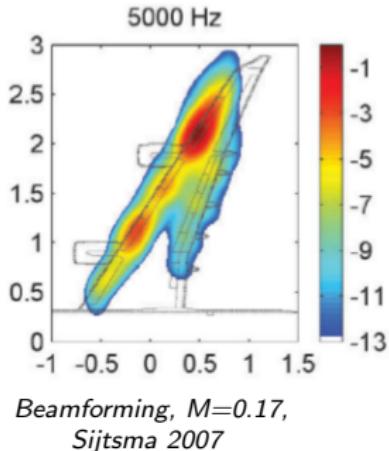
Direction : Jérôme Antoni (LVA), Christophe Bailly (LMFA), Quentin Leclère (LVA)

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)
- ▶ Fluctuations de pressions
↪ caractérisation acoustique
- ▶ Sources aéroacoustiques :
 - parcimonieuses spatialement,
 - large bande fréquentielle (domaine de l'audible)
 - mesures empreintes de bruit aérodynamique (en vol et en soufflerie)
- ▶ 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 :

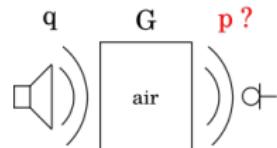
- ▶ Approche bayésienne
- ▶ Connaissances a priori : modèles analytiques/numériques + autres données expérimentales
- ▶ Qualité ?

2. Localisation des sources : approche bayésienne

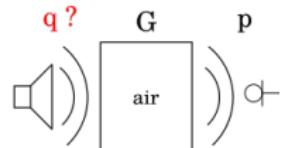
- ▶ Contraindre l'inversion : physique des sources
- ▶ Critère de qualité ? (qualitatif et quantitatif)
- ▶ Méthodes numériques

Imagerie US vs localisation de sources

► Localisation de sources acoustique



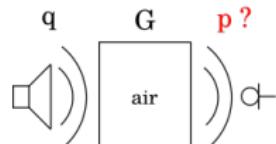
Problème direct



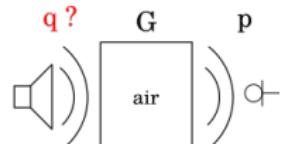
Problème inverse

Imagerie US vs localisation de sources

► Localisation de sources acoustique

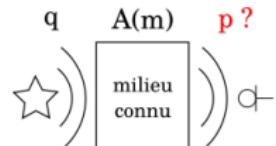


Problème direct

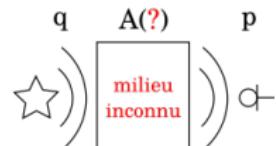


Problème inverse

► Imagerie par ultrasons



Problème direct



Problème inverse

Imagerie ultrasonore de soudures par inversion de formes d'onde

Alice DINSENMEYER

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



Institut des sciences de la Terre, Grenoble

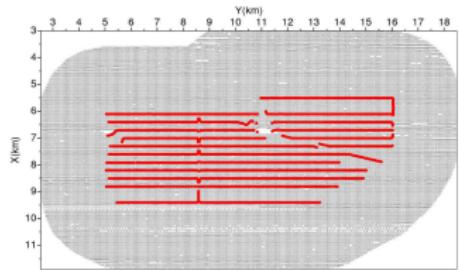
- ▶ 280 personnes, dont 108 chercheurs et 80 doctorants (2016)
- ▶ Géochimie (géologie, minéralogie)
- ▶ Géophysique (mécanique, ondes tectonique, cycle sismique, magnétisme)
- ▶ Risque et environnement

Équipe

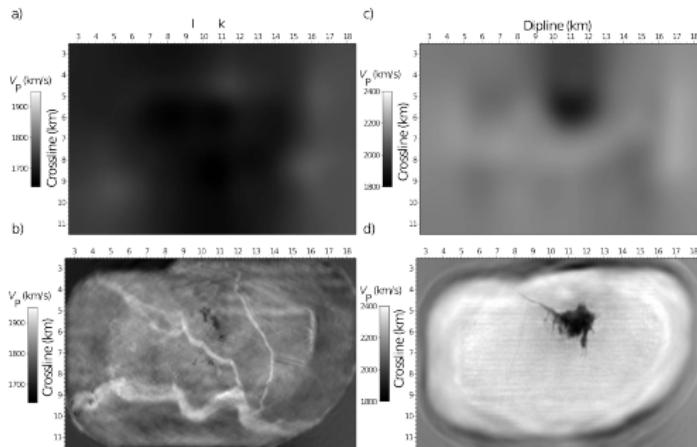


Projet Seiscope

- ≈ 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 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

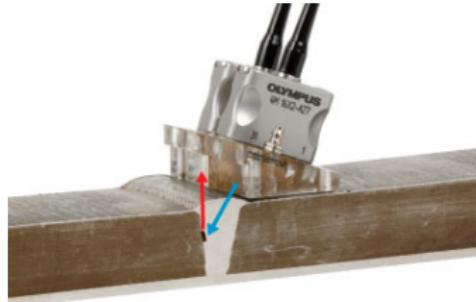


Image Olympus

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, . . .

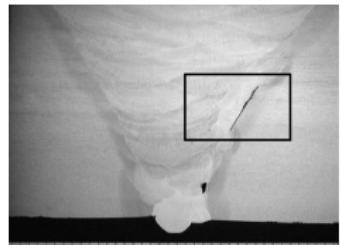
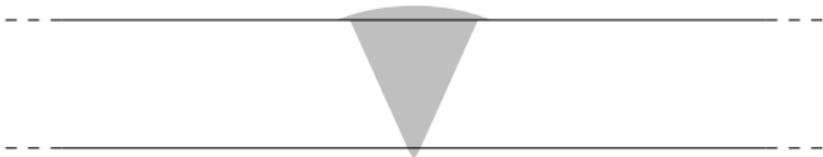


Image extraite de Consonni et al.,
Insight, 2011

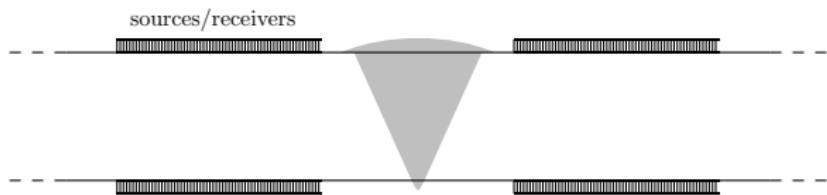
Spécificité de l'imagerie de soudure

- ▶ 2 surfaces libres : réflexions multiples ↔ non-linéarité de l'inversion



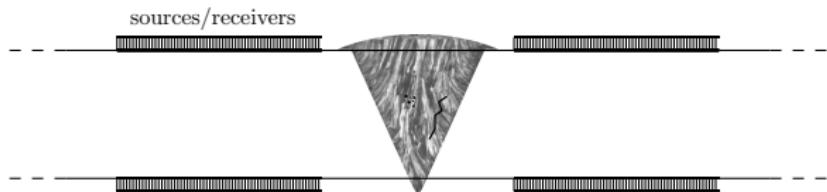
Spécificité de l'imagerie de soudure

- ▶ 2 surfaces libres : réflexions multiples ↔ non-linéarité de l'inversion
- ▶ Acquisition de surface : limitation de la résolution



Spécificité de l'imagerie de soudure

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



Contexte

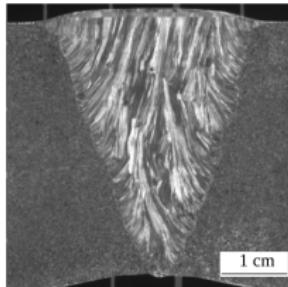


Image extraite de Chassignole, 2010

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

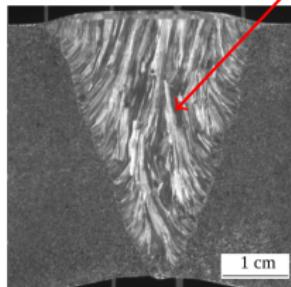
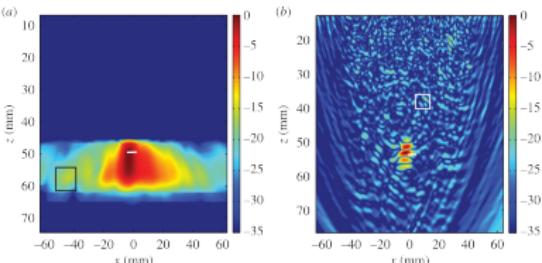


Image extraite de Chassignole, 2010

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

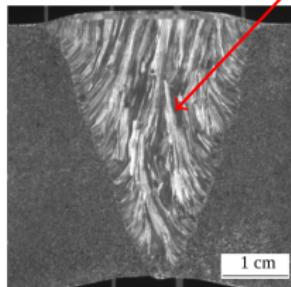
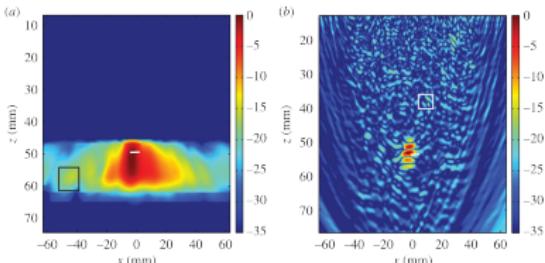


Image extraite de Chassignole, 2010

Macrographie d'une soudure austénitique



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

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

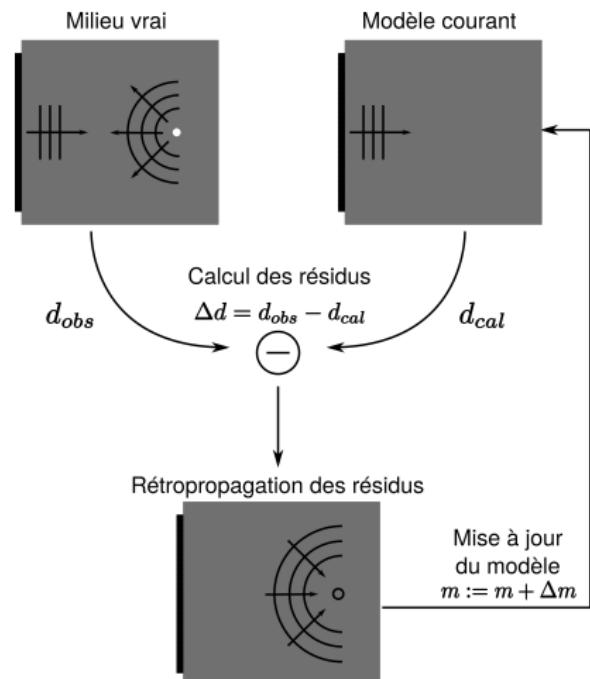
- méthodes par sommation cohérente des signaux (ex : FTP)
- Décomposition des matrices de covariance (ex : DORT)
- Résolution d'un problème d'optimisation



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

Full Waveform Inversion

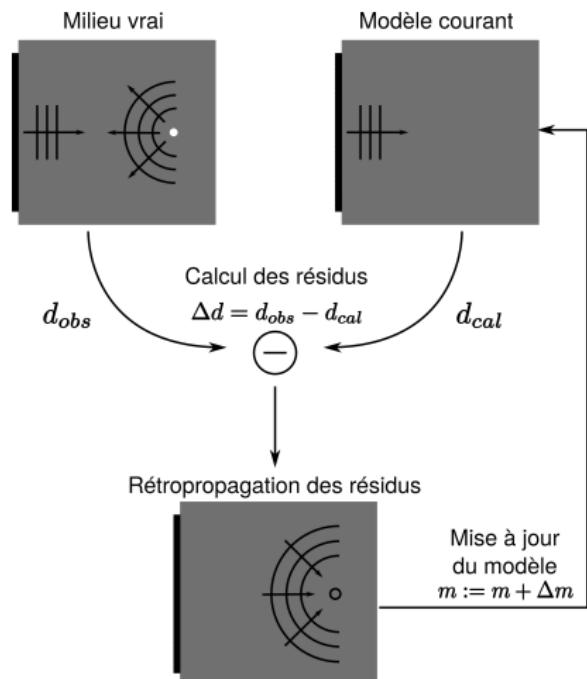
- ▶ Développée pour la géophysique
- ▶ Estimation des paramètres élastiques
↪ optimisation locale
- ▶ Utilise tout le champ d'onde



Full Waveform Inversion

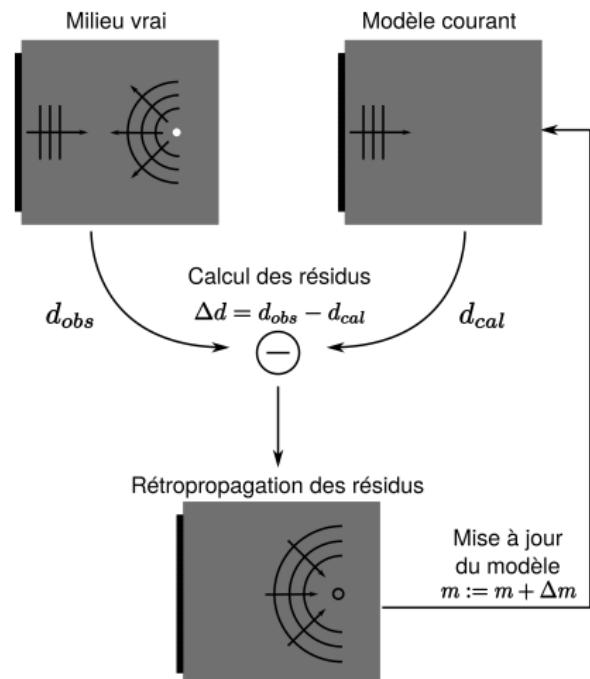
- ▶ Fonction de coût :

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



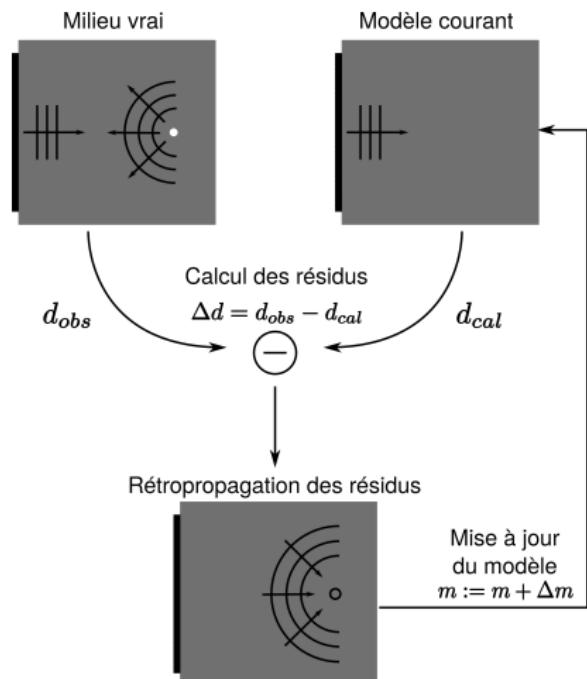
Full Waveform Inversion

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



Calcul du gradient

- ▶ Problème direct...

$$\mathbf{A}(\mathbf{m}, \mathbf{x}, t) \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}, \mathbf{x}, t) = \mathbf{s}(\mathbf{x}, t)$$

Calcul du gradient

- ▶ Problème direct...

$$\mathbf{A}(\mathbf{m}, \mathbf{x}, t) \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}, \mathbf{x}, t) = \mathbf{s}(\mathbf{x}, t)$$

- ▶ ...dérivé par rapport à \mathbf{m} :

$$\mathbf{A} \frac{\partial \tilde{\mathbf{d}}_{cal}(\mathbf{m})}{\partial m_i} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \tilde{\mathbf{d}}_{cal}(\mathbf{m}) = \mathbf{0}$$

Calcul du gradient

- ▶ Problème direct...

$$\mathbf{A}(\mathbf{m}, \mathbf{x}, t) \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m}, \mathbf{x}, t) = \mathbf{s}(\mathbf{x}, t)$$

- ▶ ...dérivé par rapport à \mathbf{m} :

$$\mathbf{A} \frac{\partial \tilde{\mathbf{d}}_{cal}(\mathbf{m})}{\partial m_i} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \tilde{\mathbf{d}}_{cal}(\mathbf{m}) = \mathbf{0}$$

- ▶ Expression du gradient

$$\begin{aligned}\frac{\partial C(\mathbf{m})}{\partial m_i} &= - \left(\frac{\partial \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})}{\partial m_i} \right)^t (\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})) \\ &= {}^t \tilde{\mathbf{d}}_{cal} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\mathbf{A}^{-1} (\tilde{\mathbf{d}}_{obs} - \tilde{\mathbf{d}}_{cal})}_{\text{résidus rétropopagés}}\end{aligned}$$

Calcul du gradient

- ▶ Problème direct...

$$\mathbf{A}(\mathbf{m}, \mathbf{x}, t) \tilde{\mathbf{d}}_{cal}(\mathbf{m}, \mathbf{x}, t) = \mathbf{s}(\mathbf{x}, t)$$

- ▶ ...dérivé par rapport à \mathbf{m} :

$$\mathbf{A} \frac{\partial \tilde{\mathbf{d}}_{cal}(\mathbf{m})}{\partial m_i} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \tilde{\mathbf{d}}_{cal}(\mathbf{m}) = \mathbf{0}$$

- ▶ Expression du gradient

$$\begin{aligned}\frac{\partial C(\mathbf{m})}{\partial m_i} &= - \left(\frac{\partial \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})}{\partial m_i} \right)^t (\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{cal}(\mathbf{m})) \\ &= {}^t \tilde{\mathbf{d}}_{cal} \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right) \underbrace{\mathbf{A}^{-1} (\tilde{\mathbf{d}}_{obs} - \tilde{\mathbf{d}}_{cal})}_{\text{résidus rétropopagés}}\end{aligned}$$

Le gradient découle du calcul de 2 problèmes directs :

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

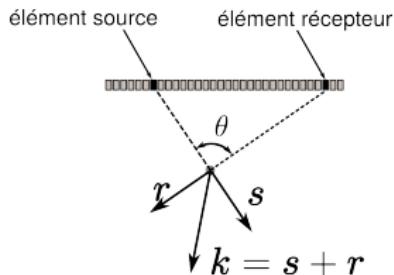
Estimation du Hessien

$$\Delta m = -(\boxed{C''})^{-1} \quad C'$$

Hessien calculé à partir du gradient (algo L-BFGS)

Résolution de la FWI

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



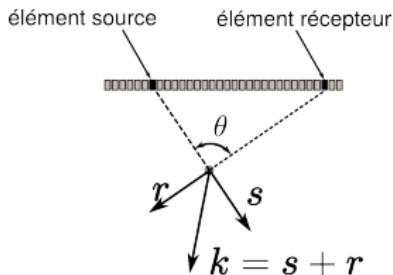
Résolution de la FWI

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

► Résolution 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 $\theta = 0$



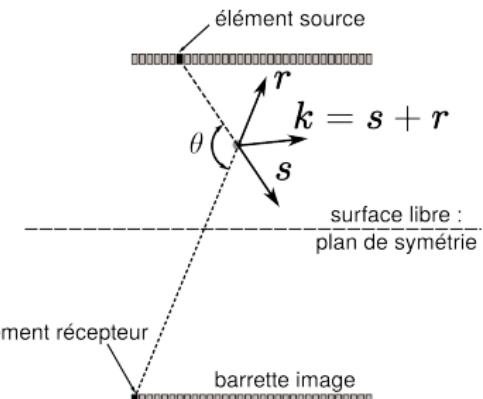
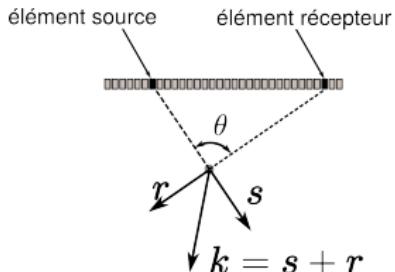
Résolution de la FWI

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

► Résolution du gradient :

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

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



Résolution de la FWI

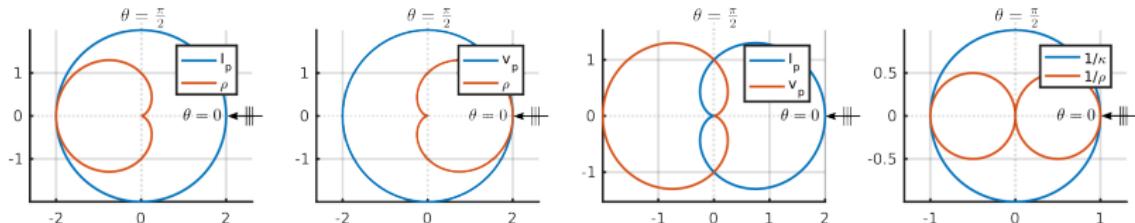
$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = \underbrace{^t \tilde{\mathbf{d}}_{cal}}_{\text{champ incident}} \boxed{\underbrace{\left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right)}_{\text{résidus rétropagés}}} \underbrace{\lambda}_{\text{ }} \\ \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \quad \sim \Re(e^{jk_0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

- Résolution du gradient :

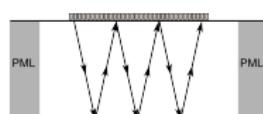
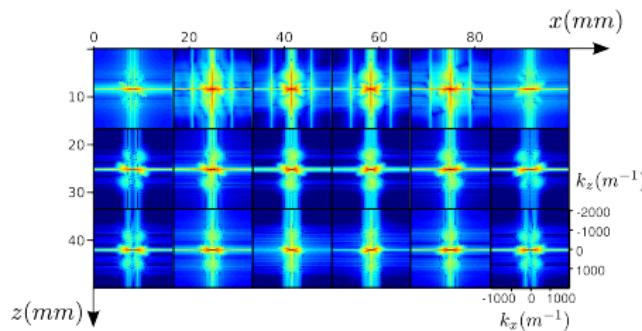
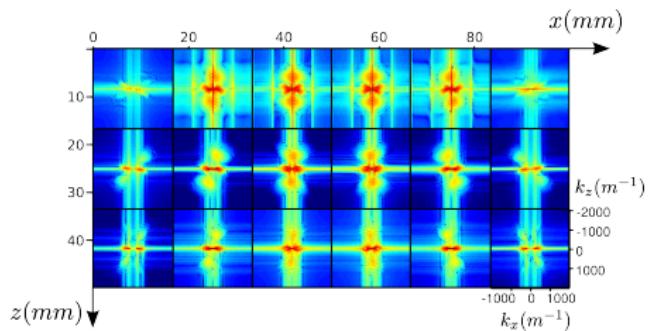
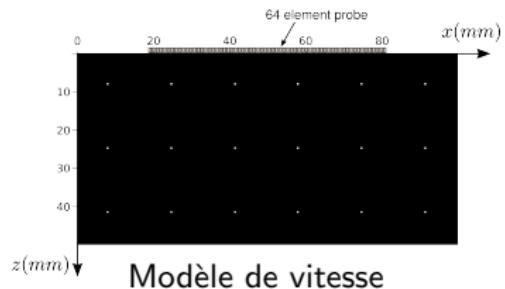
$$k = |\mathbf{s} + \mathbf{r}| = \frac{\omega}{c} 2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

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

- Rayonnement des paramètres :

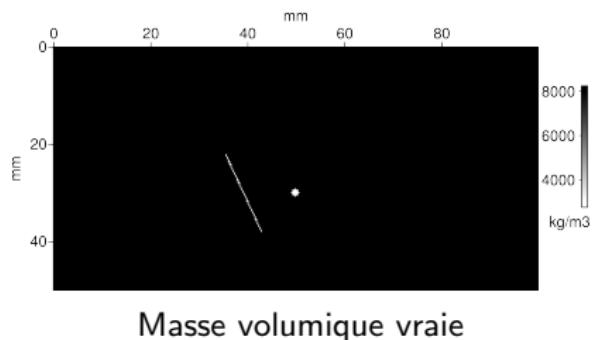
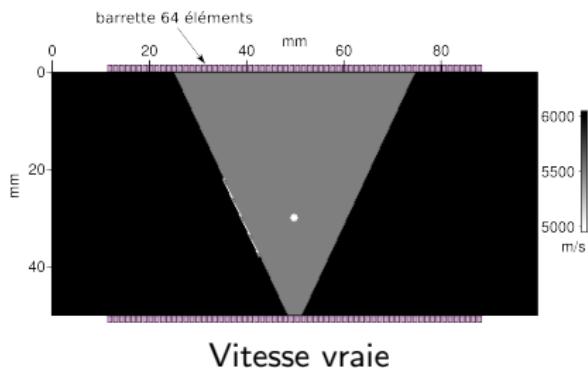


Résolution de la FWI



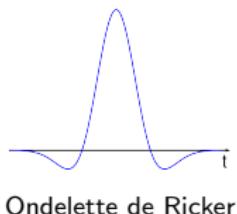
Inversions en milieu isotrope

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

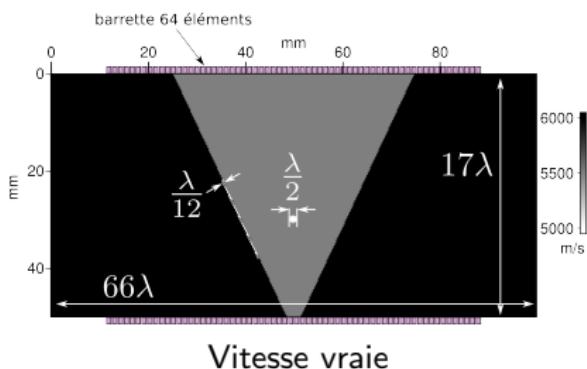


Inversions en milieu isotrope

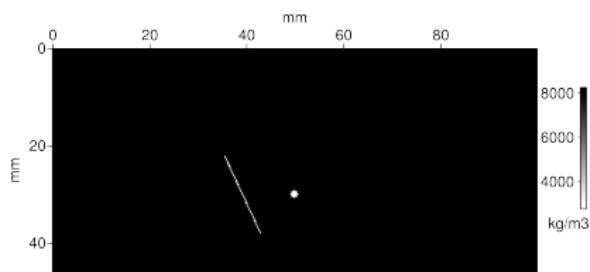
- ▶ Milieu 2D, isotrope, acoustique
- ▶ Paramétrisation : vitesse + masse volumique
- ▶ Excitation : Ricker centré à 2 MHz



Ondelette de Ricker



Vitesse vraie



Masse volumique vraie

Stratégies d'inversion

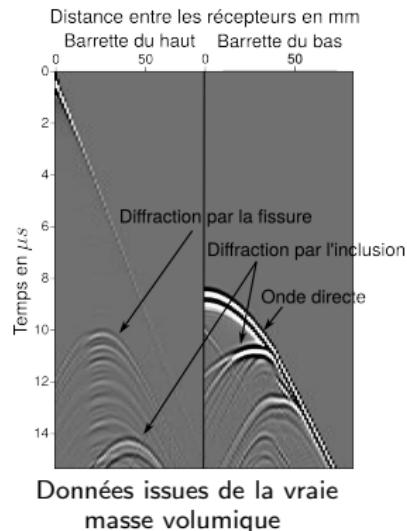
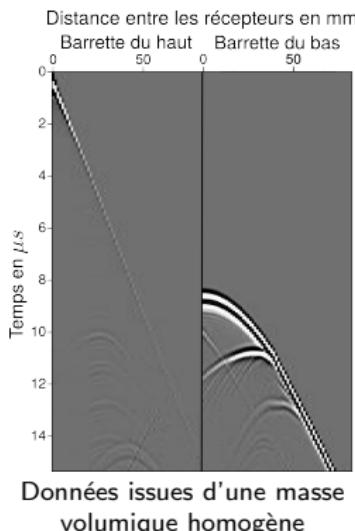
- ▶ pour contraindre le problème, lever les ambiguïtés de phase

Stratégies d'inversion

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

2 critères hiérarchiques :

- ▶ influence des paramètres sur les données

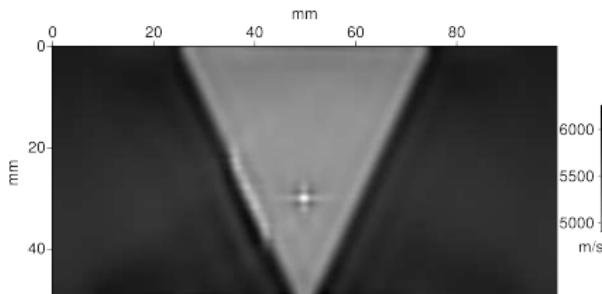


Stratégies d'inversion

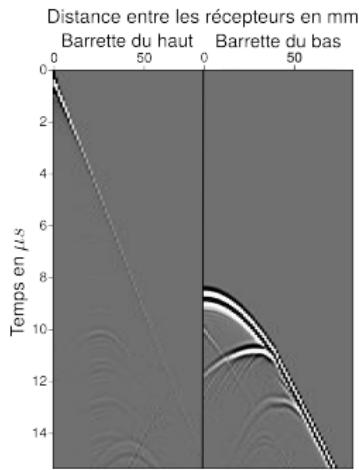
- pour contraindre le problème, lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

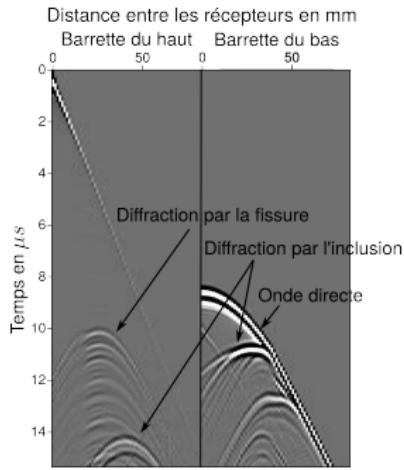
- influence des paramètres sur les données



Construction d'un modèle de vitesse lissé



Données issues d'une masse volumique homogène



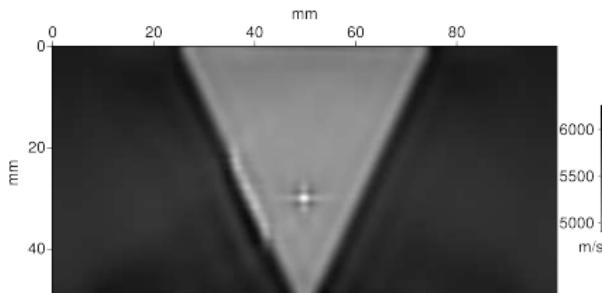
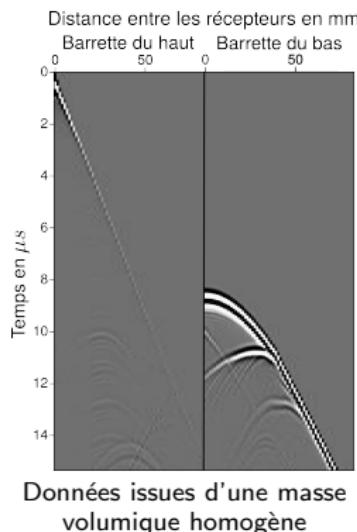
Données issues de la vraie masse volumique

Stratégies d'inversion

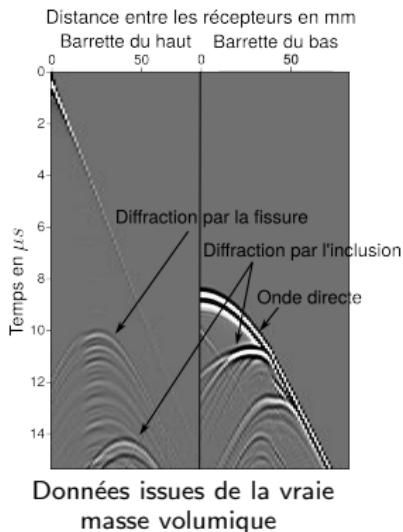
- ▶ pour contraindre le problème, lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

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



Construction d'un modèle de vitesse lissé

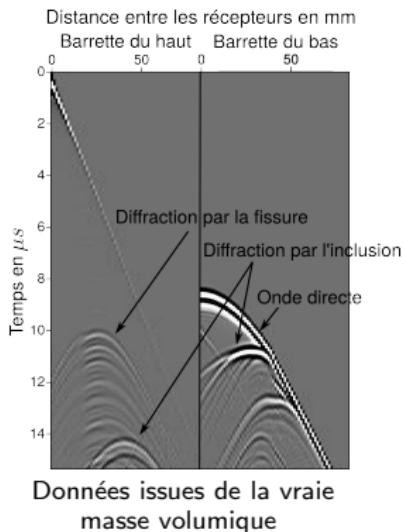
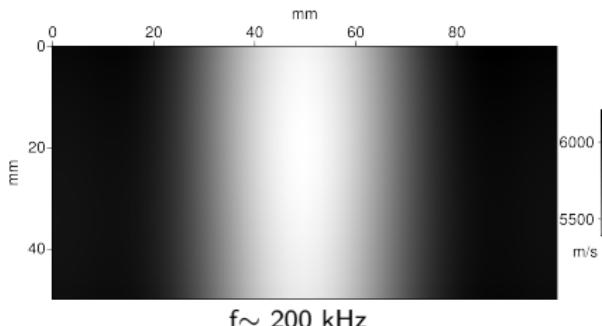
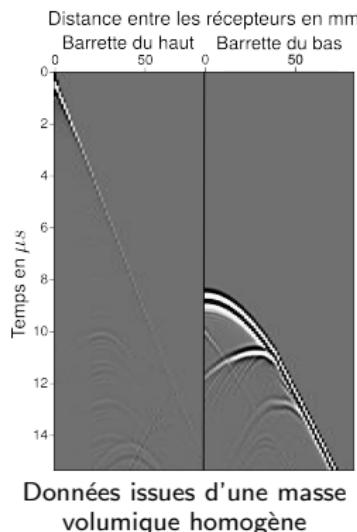


Stratégies d'inversion

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

2 critères hiérarchiques :

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

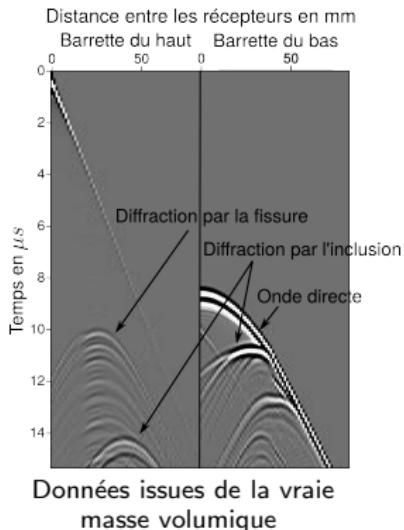
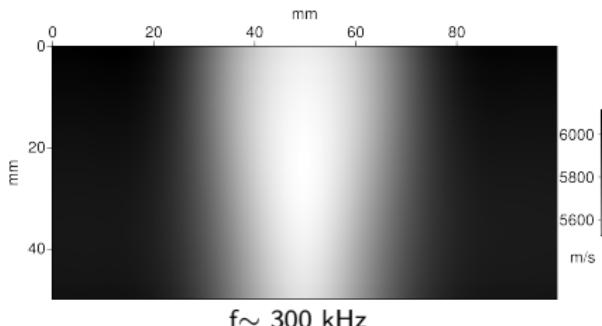
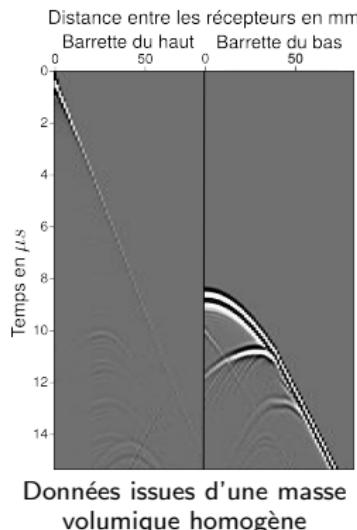


Stratégies d'inversion

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

2 critères hiérarchiques :

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

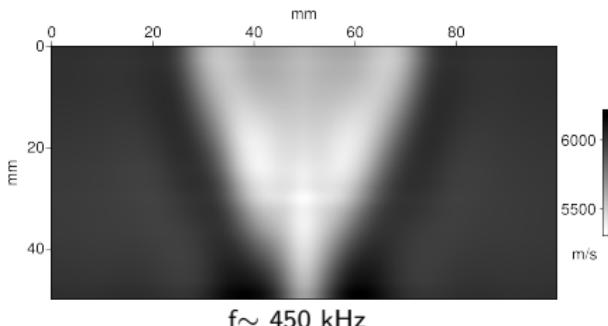
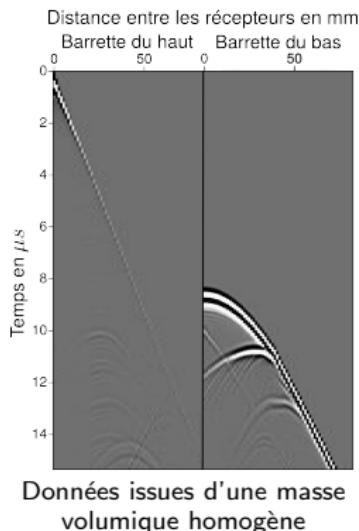


Stratégies d'inversion

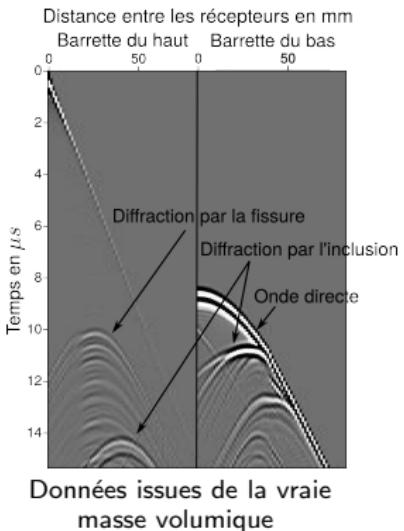
- ▶ pour contraindre le problème, lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

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



Construction d'un modèle de vitesse lissé

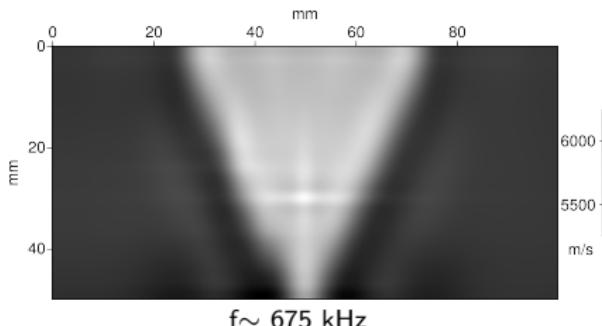
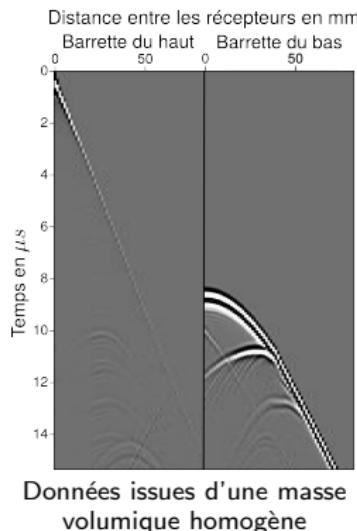


Stratégies d'inversion

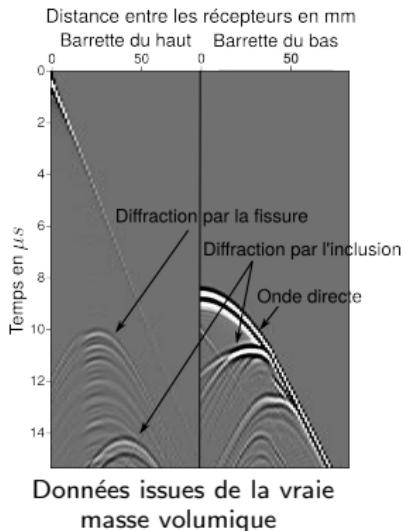
- ▶ pour contraindre le problème, lever les ambiguïtés de phase

2 critères hiérarchiques :

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



Construction d'un modèle de vitesse lissé

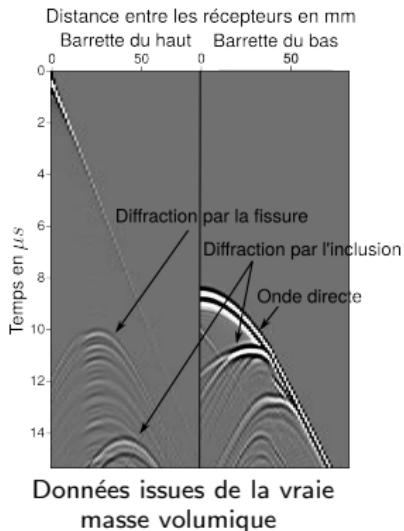
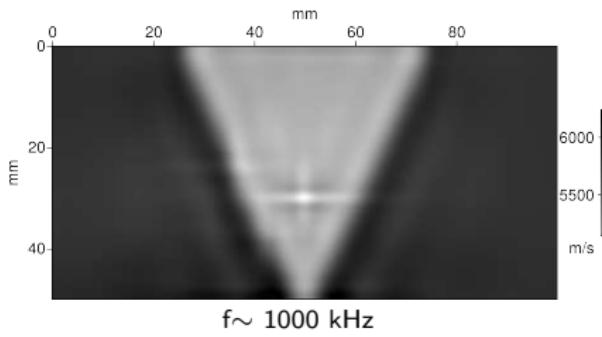
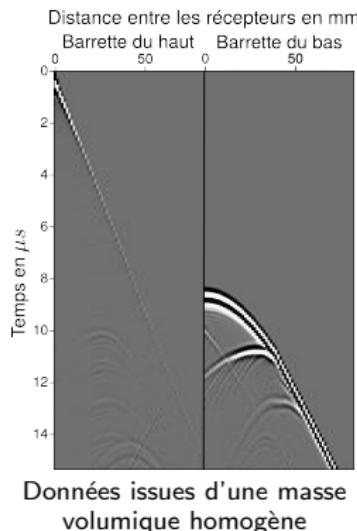


Stratégies d'inversion

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

2 critères hiérarchiques :

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

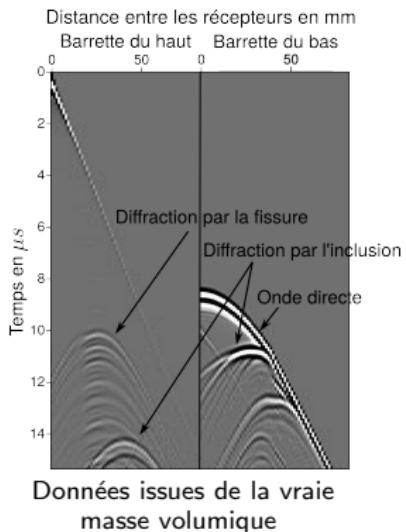
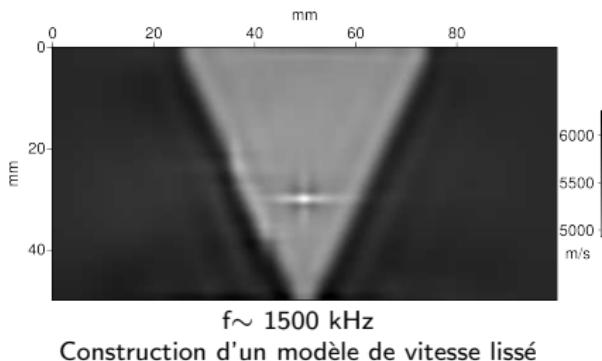
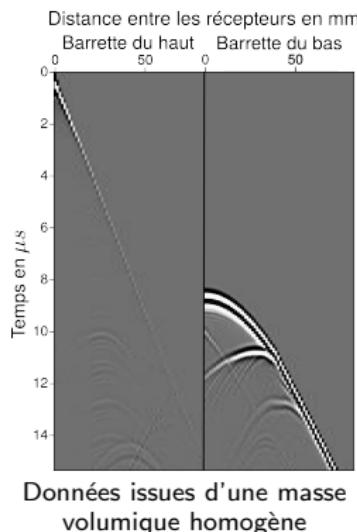


Stratégies d'inversion

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

2 critères hiérarchiques :

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

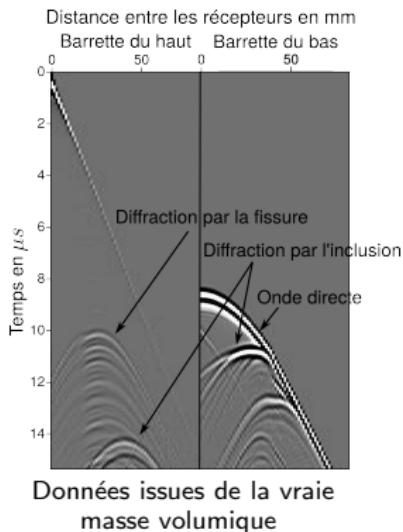
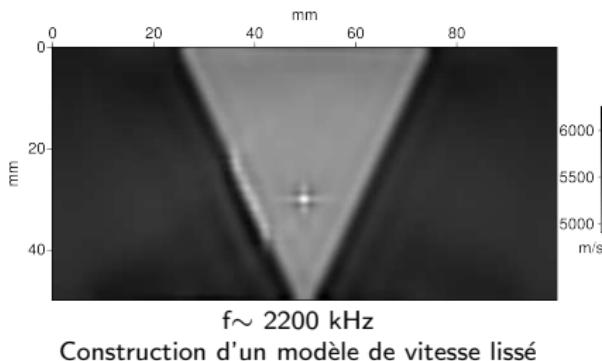
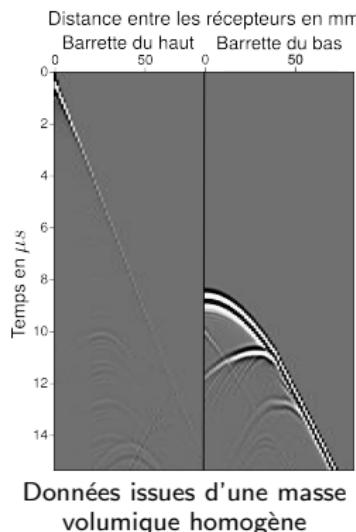


Stratégies d'inversion

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

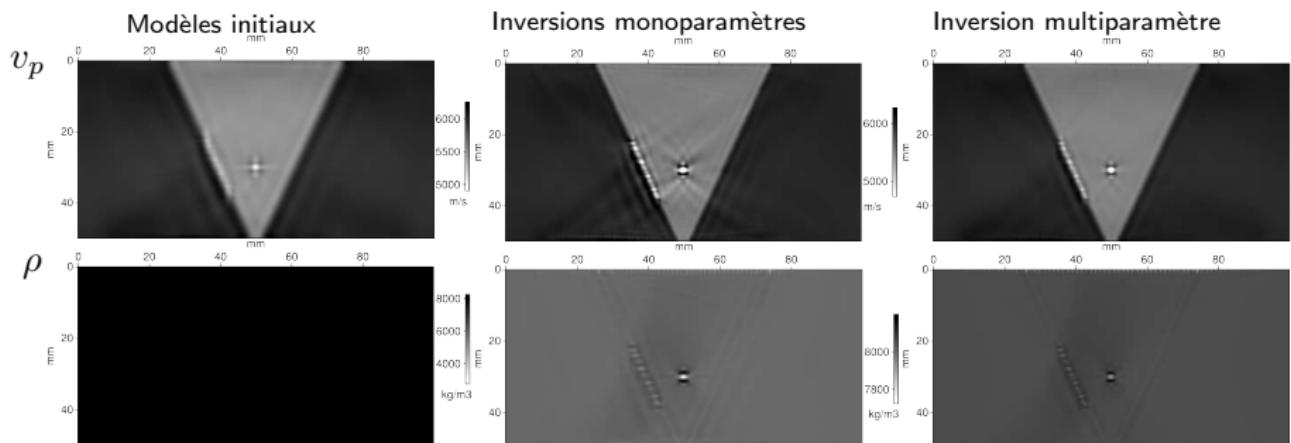
2 critères hiérarchiques :

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



Inversions en milieu isotrope

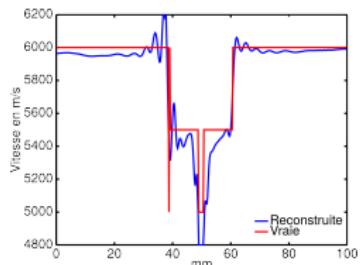
- ▶ 9 inversions successives de 200 kHz à 3 MHz



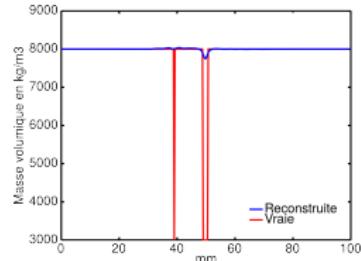
Inversions en milieu isotrope

- Inversion monoparamètre :

Vitesse :

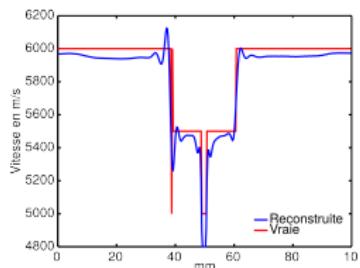


Masse volumique :

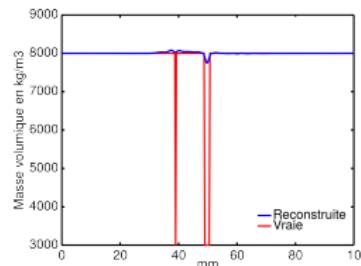


- Inversion multiparamètre :

Vitesse :



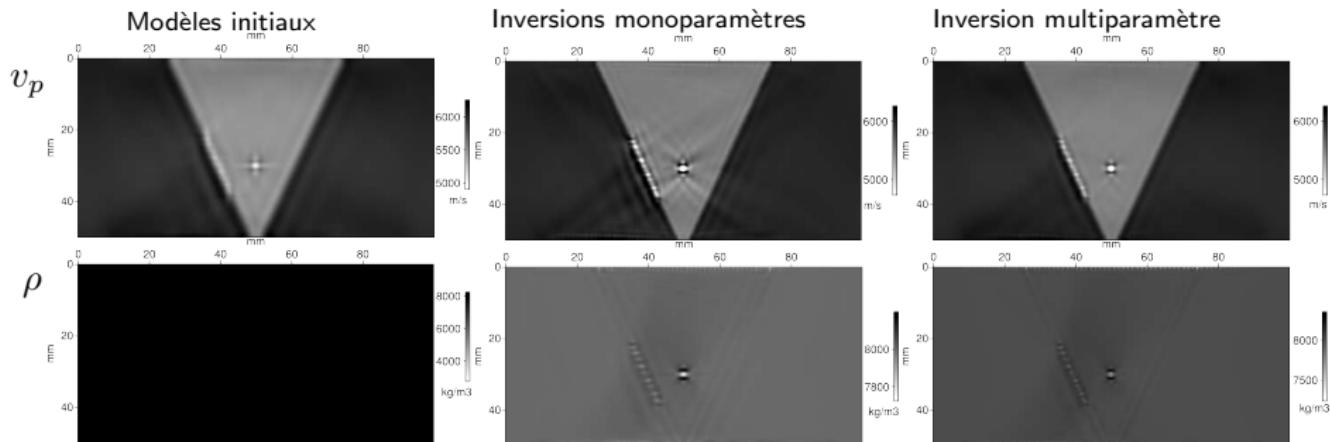
Masse volumique :



Coupes horizontales à 3 cm de profondeur

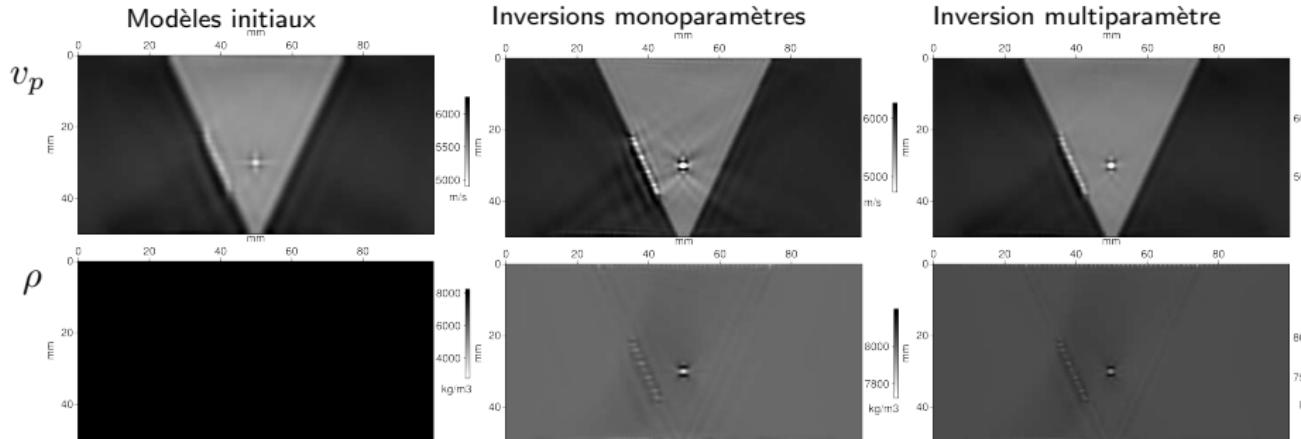
Inversions en milieu isotrope

- ▶ 9 inversions successives de 200 kHz à 3 MHz



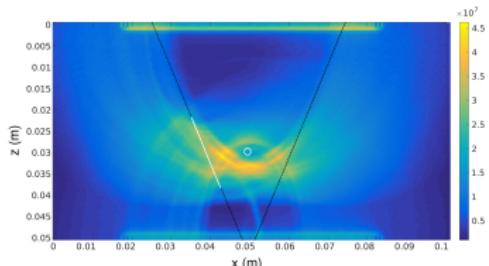
Inversions en milieu isotrope

- ▶ 9 inversions successives de 200 kHz à 3 MHz



- ▶ Comparaison avec le beamforming

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

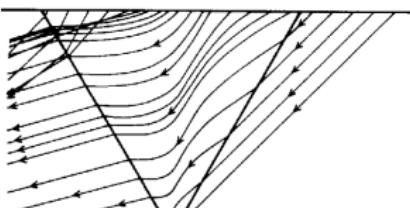
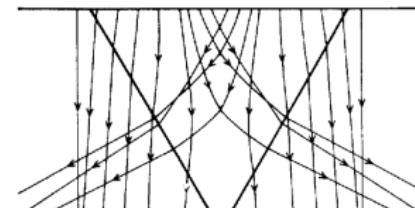
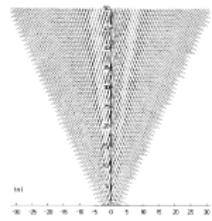


Conclusions, perspectives

- ▶ Inversion multiparamètre : corrige les artefacts

Conclusions, perspectives

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



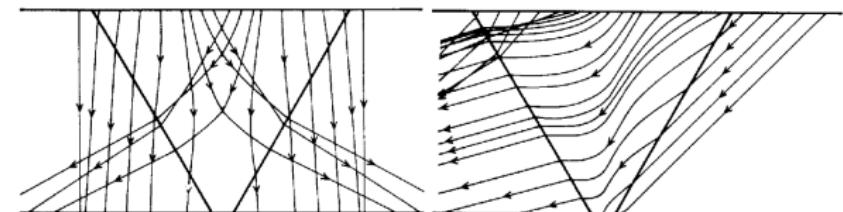
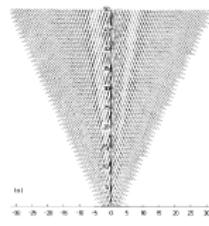
Images extraites de Ogilvy, 1986

(a) Modèle d'orientation des grains

(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

Conclusions, perspectives

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



Images extraits de Ogilvy, 1986

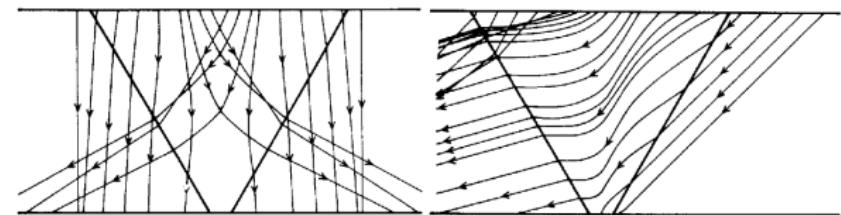
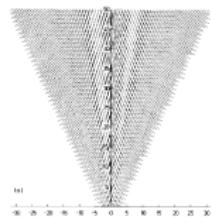
(a) Modèle
d'orientation des grains

(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

- ▶ Élaboration d'un modèle initial fiable

Conclusions, perspectives

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



Images extraites de Ogilvy, 1986

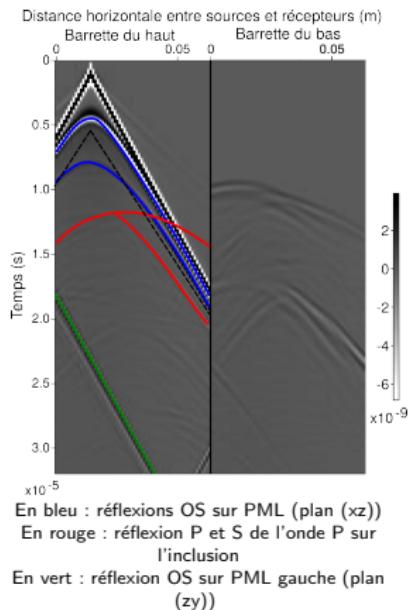
(a) Modèle d'orientation des grains

(b) Courbure des rayons (ondes de compressions)

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

Conclusions, perspectives

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



- ▶ Codes ouverts (FORTRAN 90) : <https://seiscope2.osug.fr>
optimization toolbox + codes pb direct/inverse
Transport optimal (norme de Kantorovich-Rubinstein), Métivier 2016