

## **Alice Dinsenmeyer**

Doctorante (1<sup>ère</sup> année)

*alice.dinsenmeyer@insa-lyon.fr*

*1<sup>er</sup> étage, Bât. J. Jacquard*

- ▶ 2011 – 2014 : Licence en acoustique, Université du Maine, Le Mans
- ▶ 2014 –2016 : Master recherche en acoustique, Université du Maine, Le Mans
  - Ondes dans les solides et les fluides
  - Imagerie ultrasonore
  - Psychoacoustique
  - Traitement du signal
  - Informatique scientifique

## **Méthodes inverses avec 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 aérodynamique des avions (turbomachines et profil)

Nature des sources :

- parcimonieuses spatialement
- large bande fréquentielle (not. domaine de l'audible)
- mesures empreintes de bruit aérodynamique

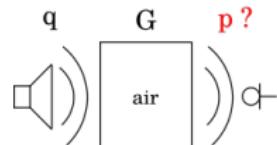
Méthodes multiples, approche empirique  
Approche déductive :

Problématiques :

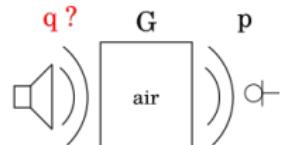
- extraction des composantes tonales, cyclostationnaires et aérodynamiques
- localisation et quantification des sources -interprétation des résultats

# Imagerie US vs localisation de sources

## ► Localisation de sources acoustique



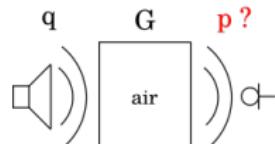
Problème direct



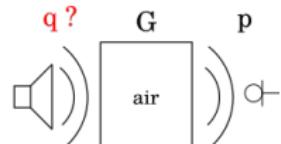
Problème inverse

# Imagerie US vs localisation de sources

## ► Localisation de sources acoustique

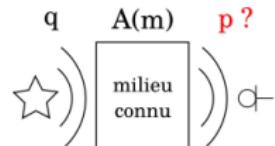


Problème direct

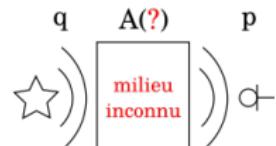


Problème inverse

## ► 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

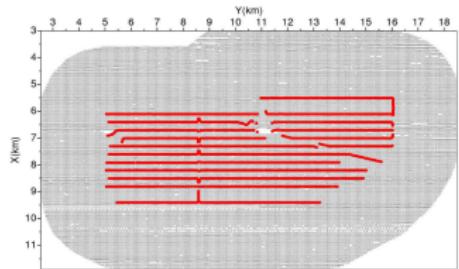
- ▶ 280 personnes, dont 108 chercheurs et 80 doctorants (2016)
- ▶ Géochimie (géologie, minéralogie)
- ▶ Géophysique (mécanique, ondes tectonique, cycle sismique, magnétisme)
- ▶ Risque et environnement

## Équipe

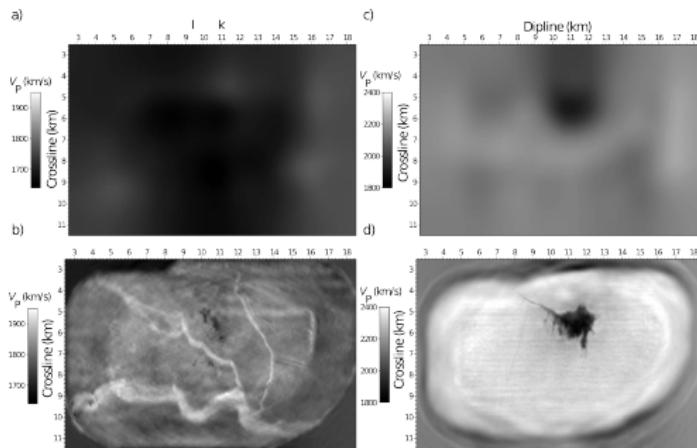


# Projet Seiscope

- $\approx 20$  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

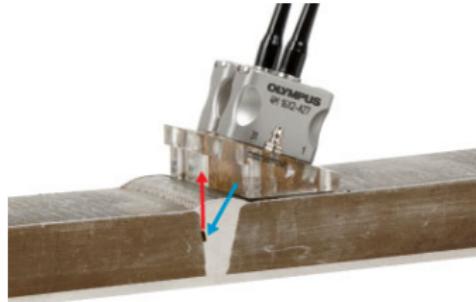


Image Olympus

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, . . .

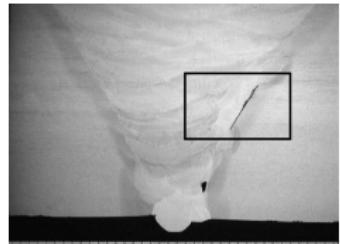
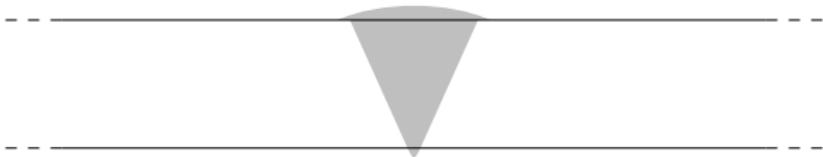


Image extraite de Consonni et al.,  
Insight, 2011

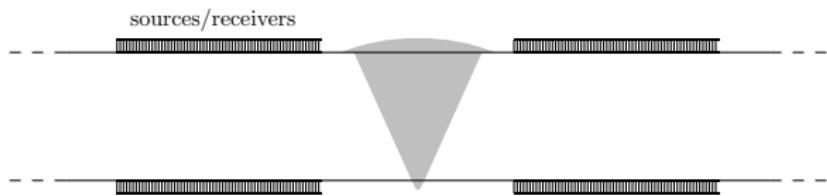
## Spécificité de l'imagerie de soudure

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



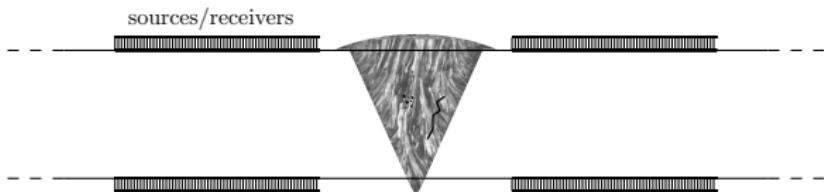
## Spécificité de l'imagerie de soudure

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

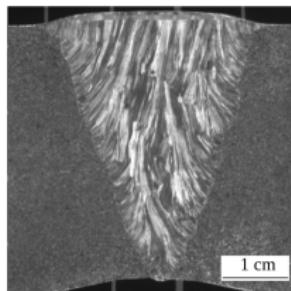


# Spécificité de l'imagerie de soudure

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



# Spécificité de l'imagerie de soudure



*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)

# Spécificité de l'imagerie de soudure

Forçante anisotropie imprévisible

→ déviation et division du faisceau ultrasonore

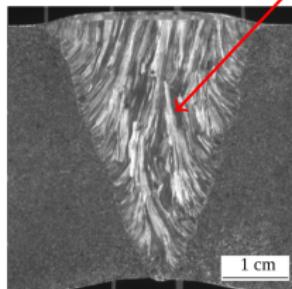
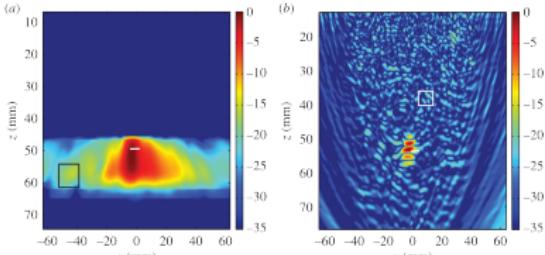


Image extraite de Chassignole, 2010

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

# Spécificité de l'imagerie de soudure

Forçante anisotropie imprévisible

→ déviation et division du faisceau ultrasonore

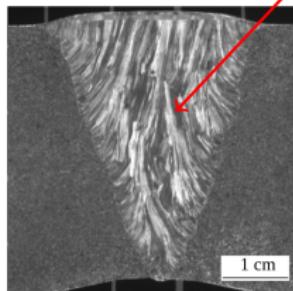
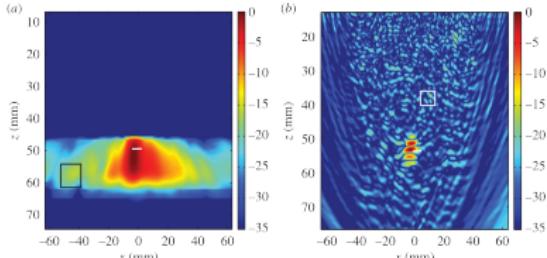


Image extraite de Chassignole, 2010

Macrographie d'une soudure austénitique



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

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

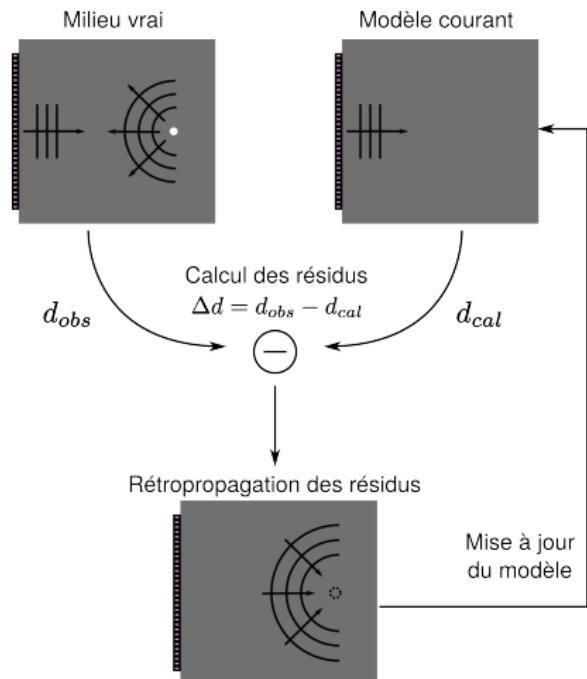
- méthodes par sommation cohérente des signaux (ex : FTP)
- Décomposition des matrices de covariance (ex : DORT)
- Résolution d'un problème d'optimisation

→

- ✗ 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

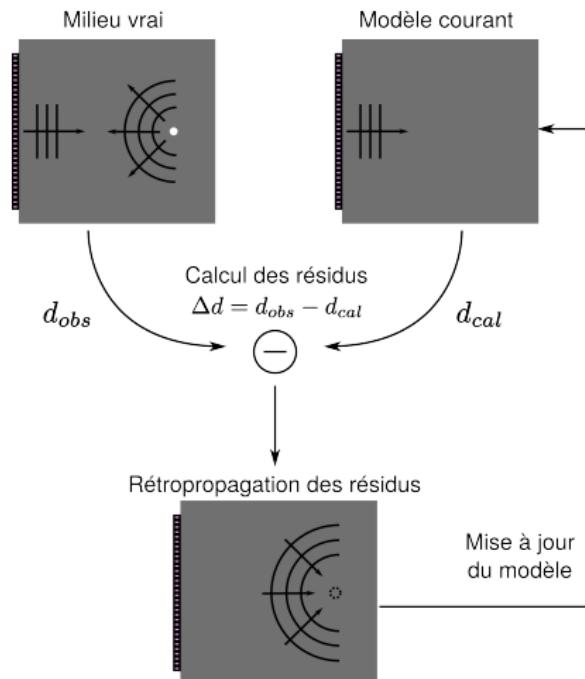
- ▶ Développée pour la géophysique
- ▶ Estimation des paramètres élastiques  
    → optimisation locale
- ▶ Utilise tout le champ d'onde



# Full Waveform Inversion

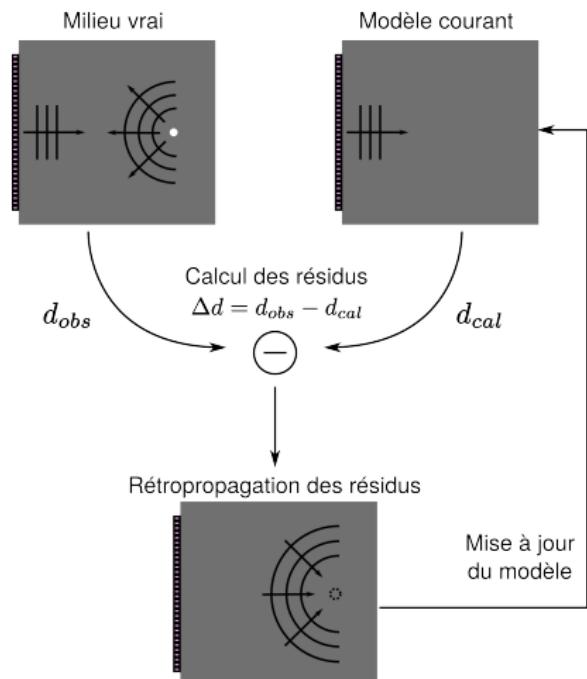
- ▶ Fonction de coût :

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



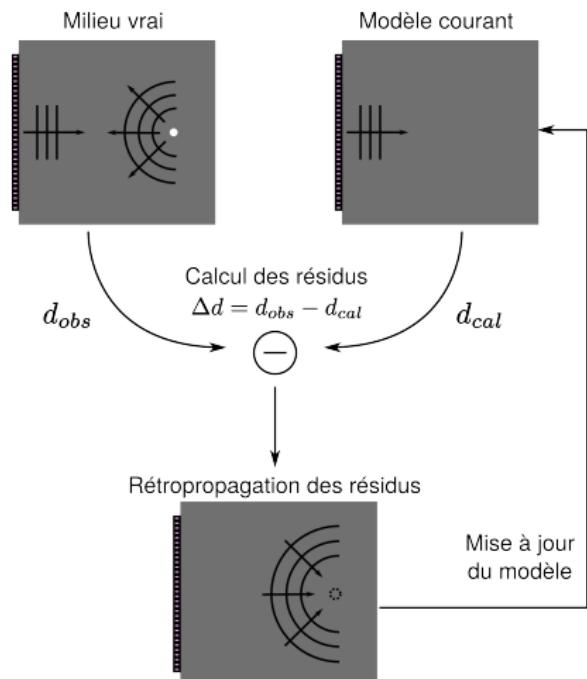
# Full Waveform Inversion

- ▶ 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...

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

- ▶ ...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

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

# 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 :**

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

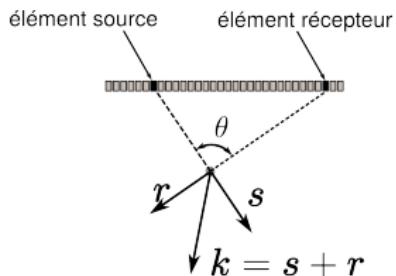
## Estimation du Hessien

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

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

# Résolution de la FWI

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



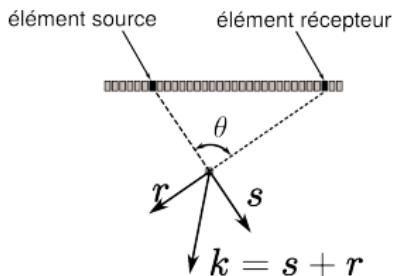
# Résolution de la FWI

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

► Résolution du gradient :

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

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



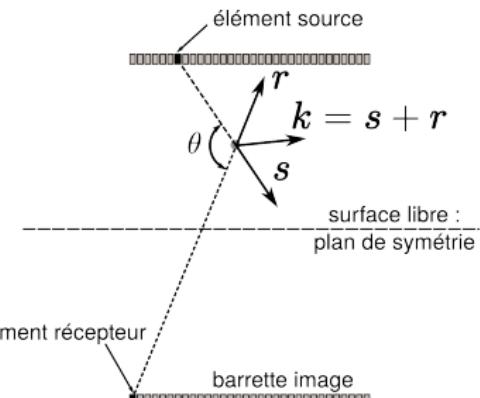
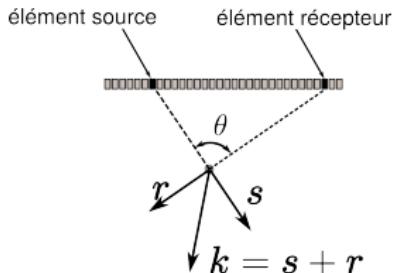
# Résolution de la FWI

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

► 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

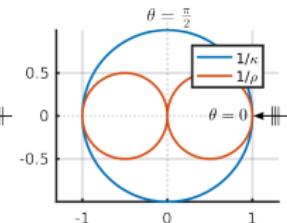
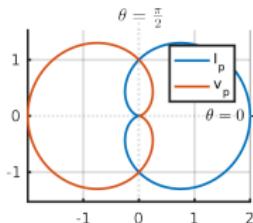
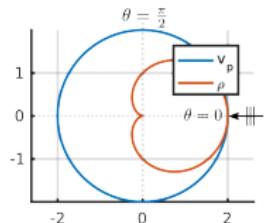
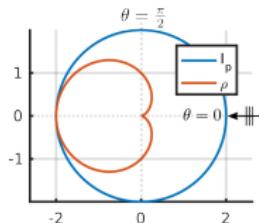
$$\frac{\partial C}{\partial m_i} = \underbrace{^t \tilde{\mathbf{d}}_{cal}}_{\text{champ incident}} \boxed{\underbrace{\left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial m_i} \right)^t}_{\text{résidus rétropagés}}} \underbrace{\lambda}_{\text{ }} \\ \sim \Re(e^{jk_0 \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}}) \quad \sim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

- Résolution du gradient :

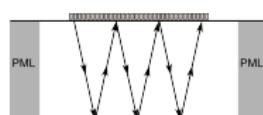
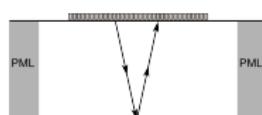
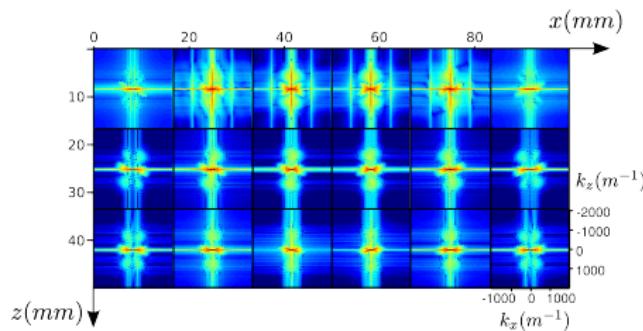
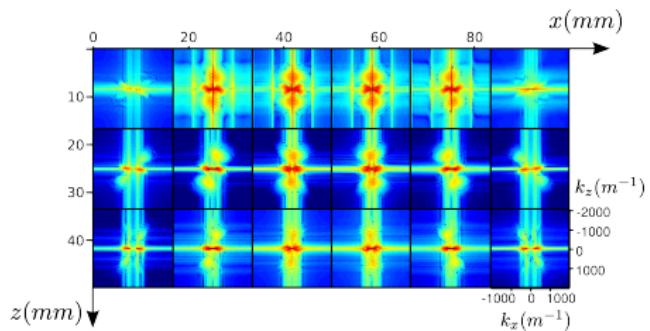
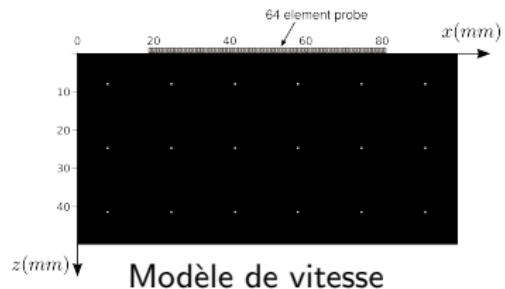
$$k = |\mathbf{s} + \mathbf{r}| = \frac{\omega}{c} 2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

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

- Rayonnement des paramètres :



# Résolution de la FWI



Améliorations : Méthodes numériques (pb direct), régularisation (pb inverse), transport optimal

code ouverts (FORTRAN 90) : optimization toolbox + codes FW  
modelling and inversion

<https://seiscope2.osug.fr>