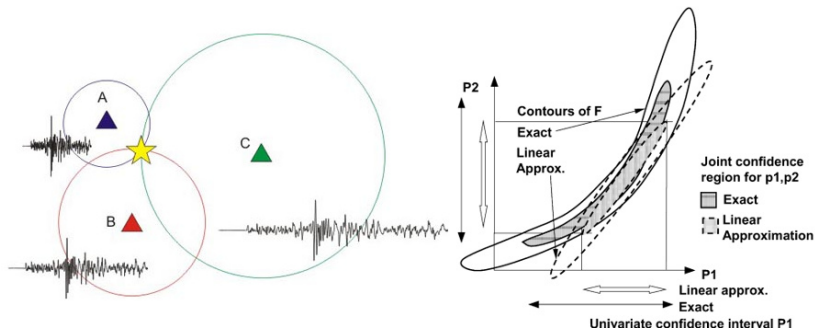


Introduction au problème inverse en Géosciences – l'approche déterministe – Exemple de l'imagerie sismique

Hervé Chauris – MINES ParisTech
herve.chauris@mines-paristech.fr

May 24, 2019





Localisation de la source

Approches déterministes et stochastiques

- ▶ Caractérisation de la source
- ▶ Caractérisation du milieu

Imagerie sismique

- ▶ Les observables = ?
- ▶ Les paramètres du modèle = ?
- ▶ La loi physique = ?

et...

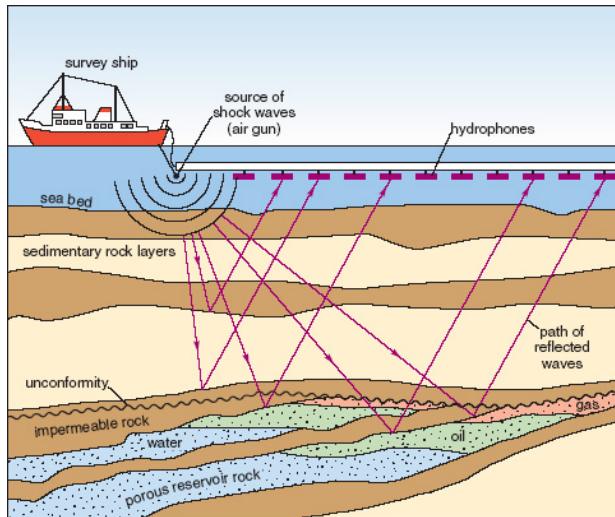
Imagerie sismique

- ▶ Les observables = ?
- ▶ Les paramètres du modèle = ?
- ▶ La loi physique = ?

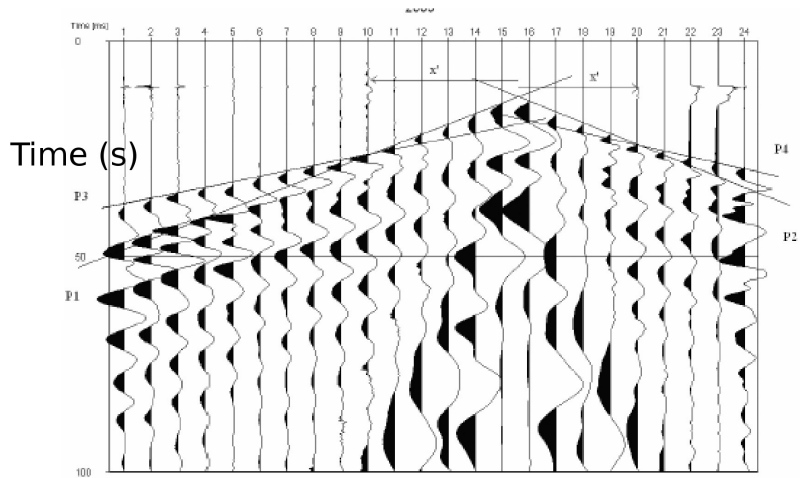
et...

- ▶ La formulation = ?
- ▶ La méthode d'optimisation (gradient) = ?
- ▶ L'information a priori = ?

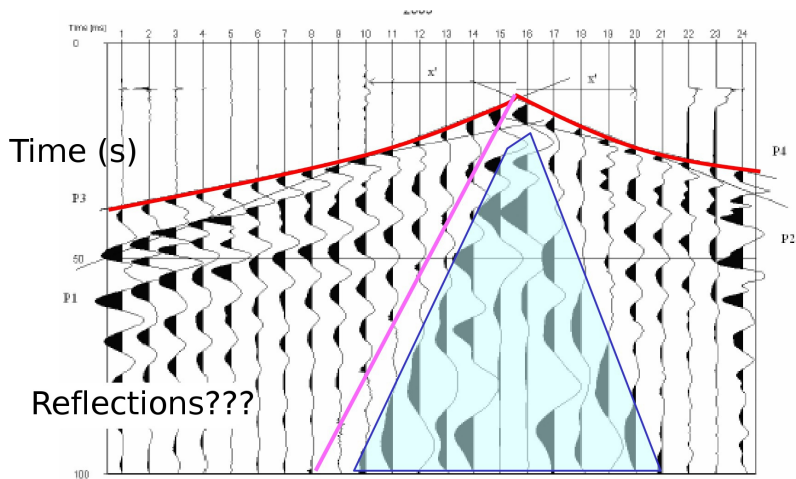
Expérience sismique



Acquisition des données – point de tir



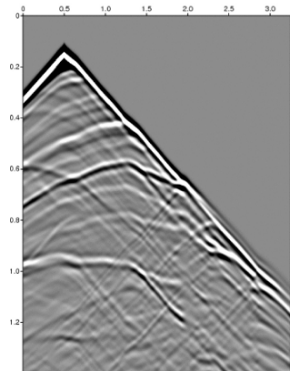
Acquisition des données – point de tir



Imagerie sismique

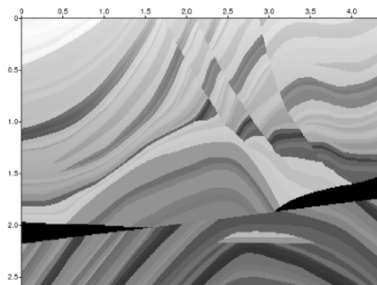
- ▶ Données = pression, déplacement, . . . , le champ complet, des temps d'arrivée, . . .
- ▶ Paramètres du modèle = vitesse de propagation des ondes (P, S, . . .), densité, atténuation, anisotropie, . . .
- ▶ Loi physique = acoustique, élastique, visco-, anisotrope, . . .

Imagerie sismique



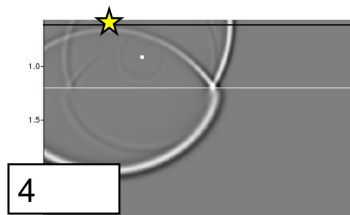
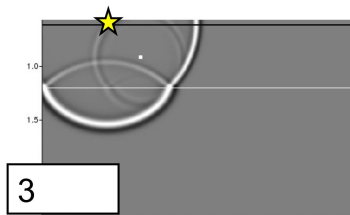
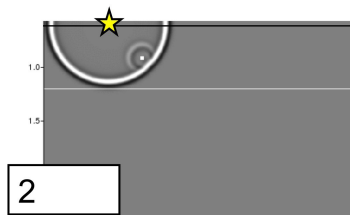
?

Inversion

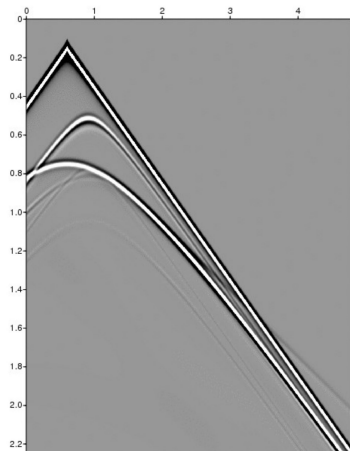


Modelling

Traitement interprétatif / (semi-)automatique



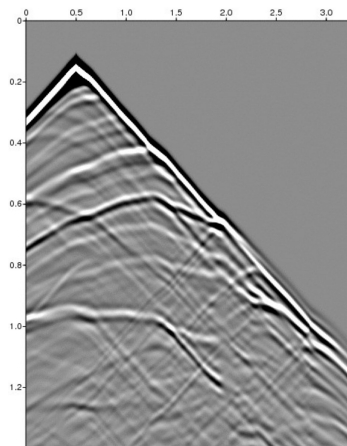
Imagerie = probl'eme inverse



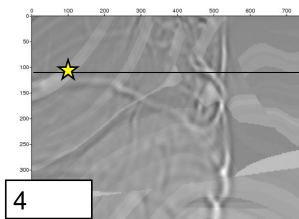
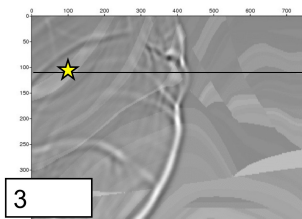
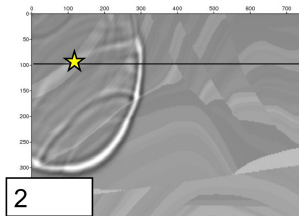
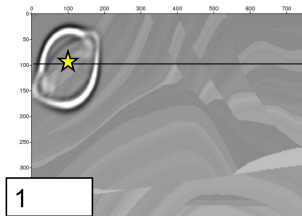
Synthetic shot gather

?

||



Observed shot gather



Compréhension de la physique, avec de possibles simplifications

Choix / stratégies

Choix / stratégies

- ▶ Définition de la **fonction objective** (ici: "*Inversion des Formes d'onde*")
- ▶ Optimisation **globale** vs. **locale** (gradient)
- ▶ Avec / sans **linéarisation**
- ▶ Modèle **initial**
- ▶ **Paramétrisation**
- ▶ **Approches hiérarchiques** (v_p puis v_p et ρ ; v_p puis v_p et I_p , ..., fréquences)
- ▶ **Information a priori**

Approche générale :

- ▶ Pas de séparation d'échelle : $m(\mathbf{x})$
- ▶ $m(\mathbf{x})$ déterminé par minimisation non-linéaire itérative

$$J[m] = \frac{1}{2} \left\| d[m] - d^{\text{obs}} \right\|^2$$
$$\left(\frac{1}{m^2(\mathbf{x})} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \Delta p \right) = S(t) \delta(\mathbf{s} - \mathbf{x})$$
$$d(s, r, t) = p(s, x = r, z = 0, t)$$

Approche générale :

- ▶ Pas de séparation d'échelle : $m(\mathbf{x})$
- ▶ $m(\mathbf{x})$ déterminé par minimisation non-linéaire itérative

$$J[m] = \frac{1}{2} \left\| d[m] - d^{\text{obs}} \right\|^2$$
$$\left(\frac{1}{m^2(\mathbf{x})} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \Delta p \right) = S(t) \delta(\mathbf{s} - \mathbf{x})$$
$$d(s, r, t) = p(s, x = r, z = 0, t)$$

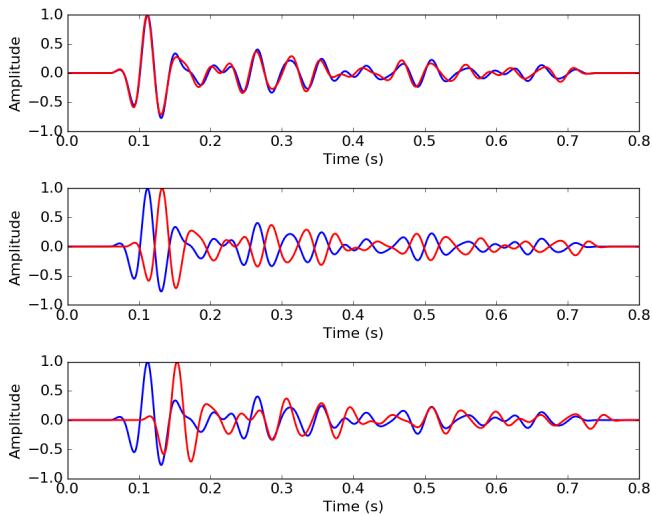
- ▶ Mise à jour

$$m_{n+1} = m_n - \alpha \partial J / \partial m|_n$$

- ▶ Premier gradient $\partial J / \partial m =$ migration (Lailly, 1983; Tarantola, 1984) avec la **méthode de l'état adjoint** (Plessix, 2006)

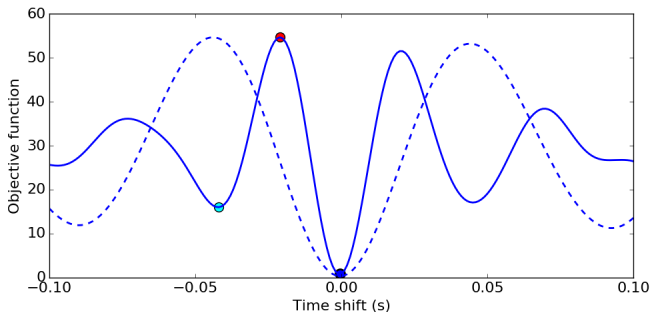
Inversion des formes d'onde – problème direct

Inversion des formes d'onde – limitations



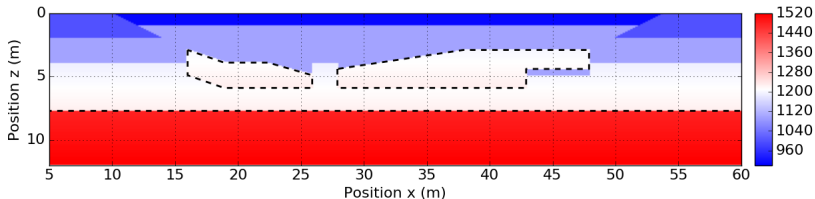
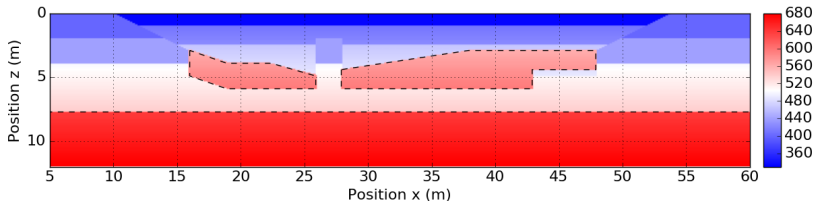
Données (bleu : observées, rouge : synthétiques)

Inversion des formes d'onde – limitations



Fonction objective

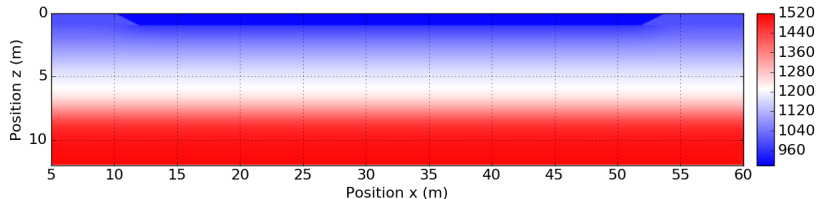
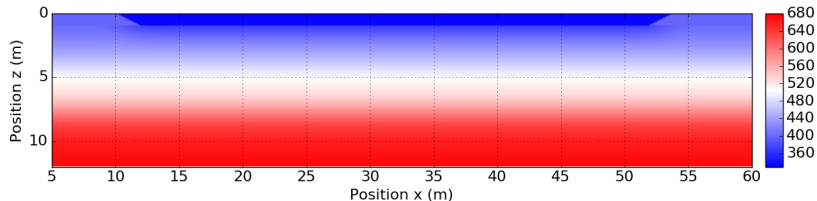
Inversion des formes d'onde – stratégies



Modèles de vitesse (haut) et de densité (bas)

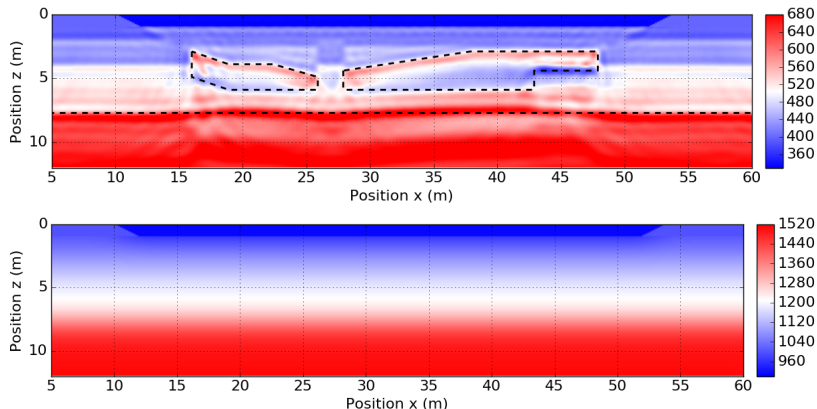
Échantillonnage : $dx = 3 \text{ m}$, $dt = 0.7 \text{ ms}$

Inversion des formes d'onde – stratégies



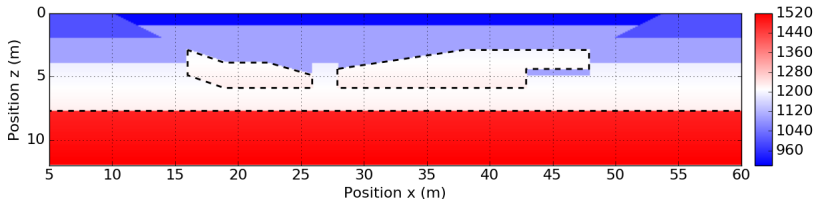
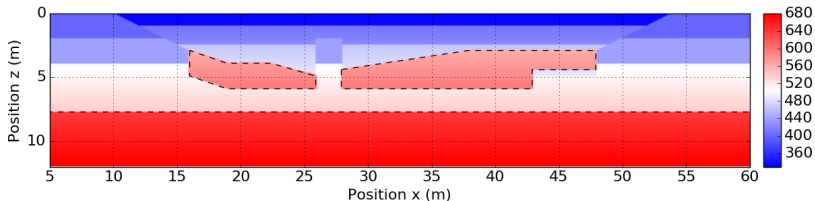
Modèles initiaux de vitesse (haut) et de densité (bas)
Valeurs correctes proche de la surface

Inversion des formes d'onde – stratégies



Modèles finaux ($f_{min} = 30$ Hz, $f_{max} = 300$ Hz) – densité non remise à jour

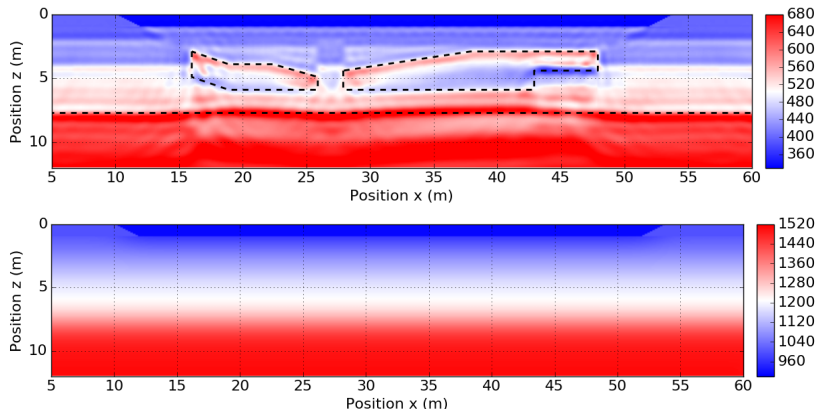
Inversion des formes d'onde – stratégies



Modèles de vitesse (haut) et de densité (bas)

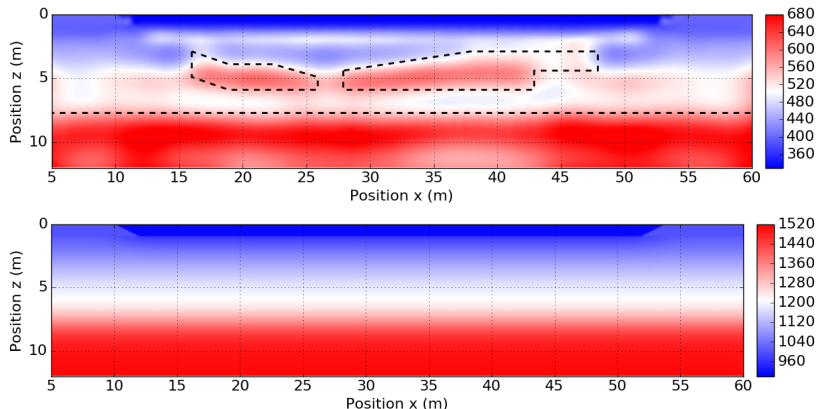
Échantillonnage : $dx = 3 \text{ m}$, $dt = 0.7 \text{ ms}$

Inversion des formes d'onde – stratégies



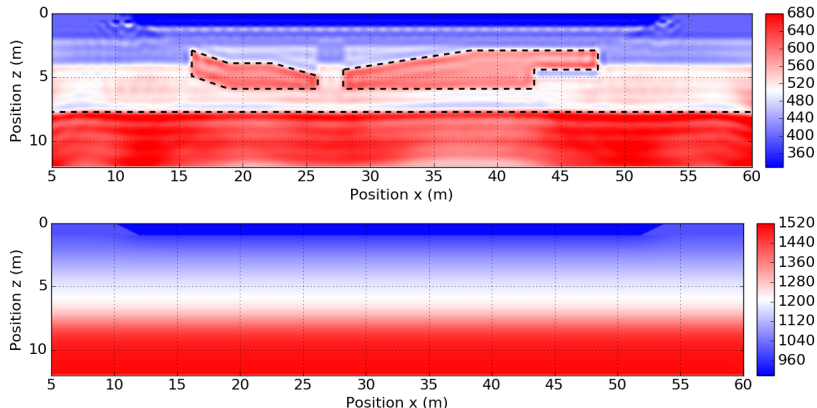
Modèles finaux ($f_{min} = 30$ Hz, $f_{max} = 300$ Hz) – densité non remise à jour

Inversion des formes d'onde – stratégies



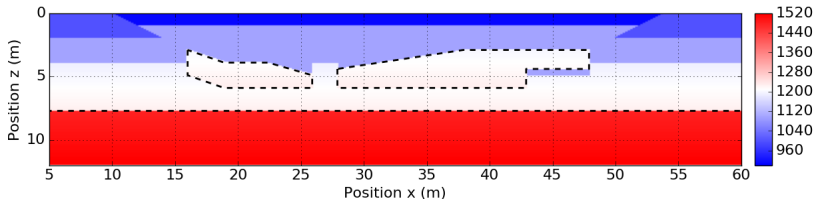
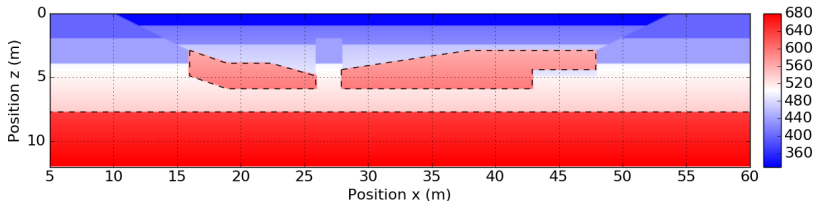
Modèles finaux ($f_{min} = 30$ Hz, $f_{max} = 60$ Hz) – densité non remise à jour

Inversion des formes d'onde – stratégies



Modèles finaux ($f_{max} = 60$ Hz puis $f_{max} = 300$ Hz) – densité non remise à jour

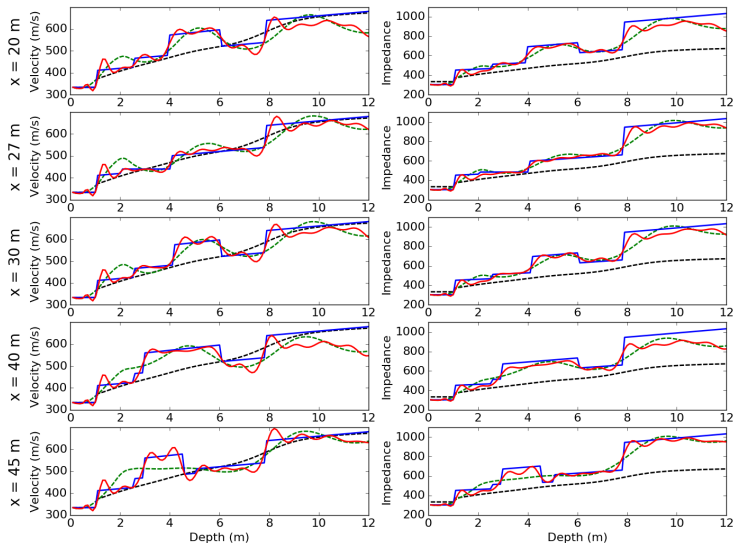
Inversion des formes d'onde – stratégies



Modèles de vitesse (haut) et de densité (bas)

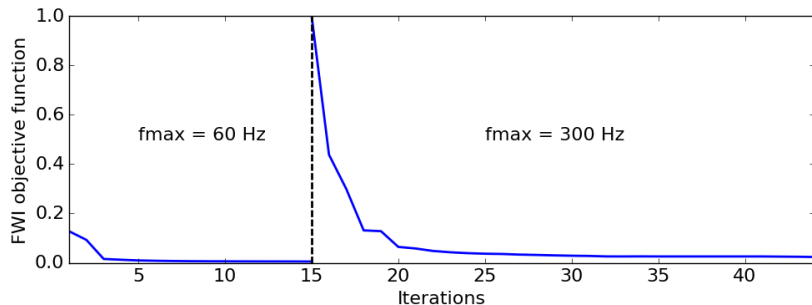
Échantillonnage : $dx = 3 \text{ m}$, $dt = 0.7 \text{ ms}$

Inversion des formes d'onde – stratégies



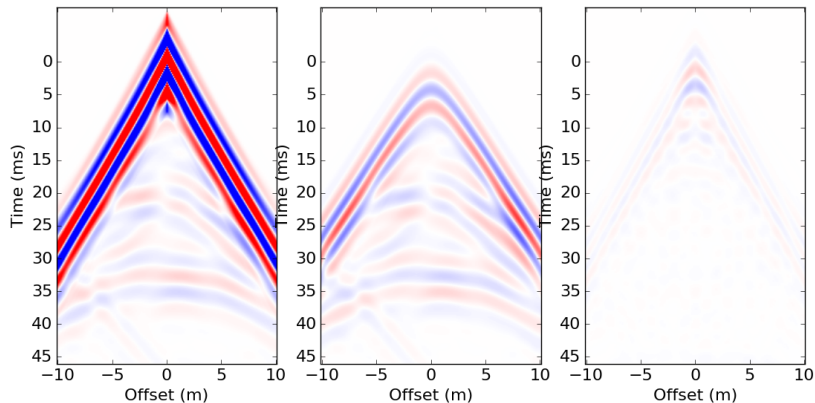
Profils de vitesse (gauche) et d'impédance (droite)

Inversion des formes d'onde – stratégies



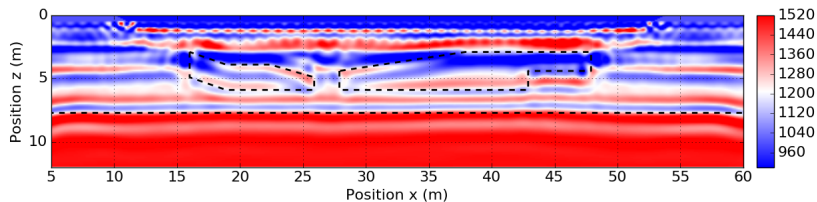
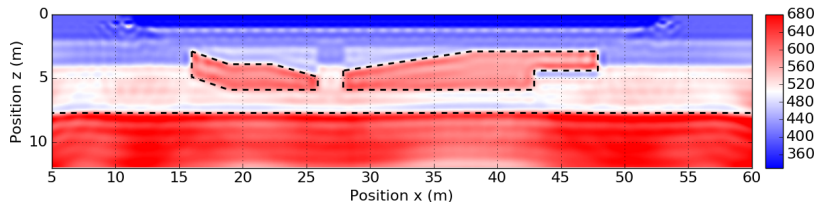
Forme de la fonction objective

Inversion des formes d'onde – stratégies



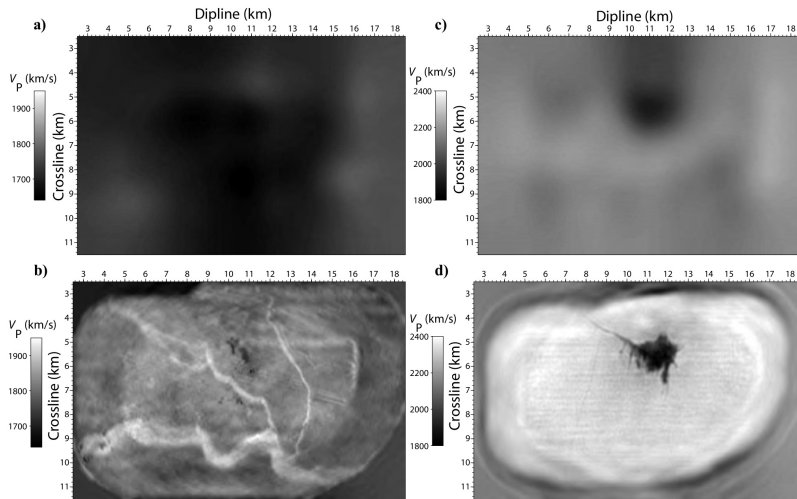
Données observées (gauche), résidus initiaux (milieu) et finaux (droite)

Inversion des formes d'onde – stratégies



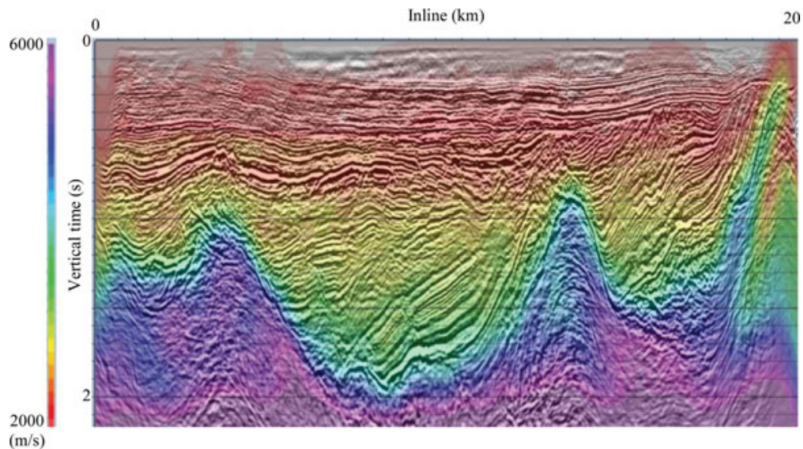
Inversion de la vitesse (haut) ou de la densité (bas)

Applications



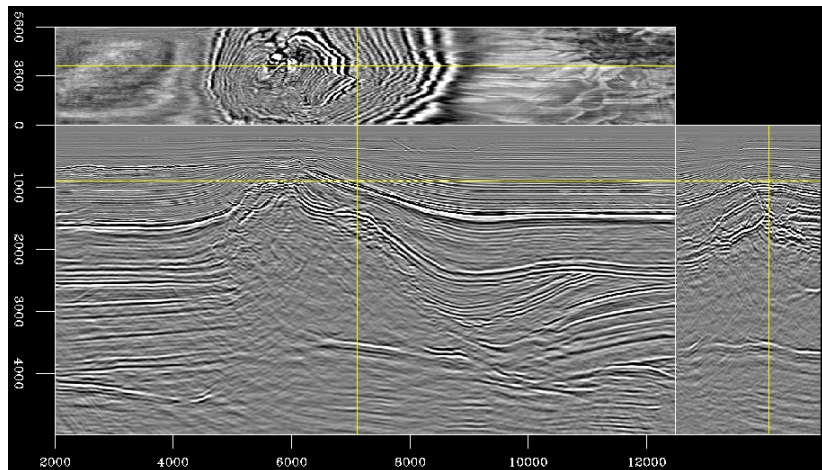
[Virieux and Operto, 2009]

Applications



[Baeten et al., 2008]

Applications



<http://sepwww.stanford.edu>

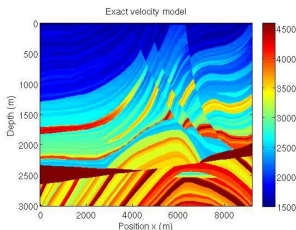
Problème inverse : pas une boîte noire

- ▶ Multi-paramètre ?
- ▶ 3d acoustique possible aujourd'hui, 3d élastique pas encore

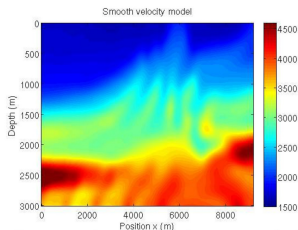
Lectures :

- ▶ Virieux, J., and S. Operto, 2009. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics, *Geophysics*, **74**(6), WCC127–152
[https://jean-virieux.obs.ujf-grenoble.fr/IMG/pdf/GPY_2009_VIRIEUX.pdf?](https://jean-virieux.obs.ujf-grenoble.fr/IMG/pdf/GPY_2009_VIRIEUX.pdf)
- ▶ <http://lg.eage.org/?evp=6380> (google: eage learning geoscience education portal bookshop)
- ▶ Albert Tarantola, www.ipgp.fr/~tarantola
- ▶ Michel Kern, cv.archives-ouvertes.fr/michel-kern

Séparation d'échelles

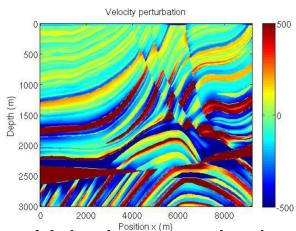


Exact velocity model

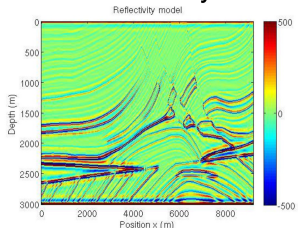


Smooth velocity model

Travel time tomography



Velocity perturbation



Optimal reflectivity

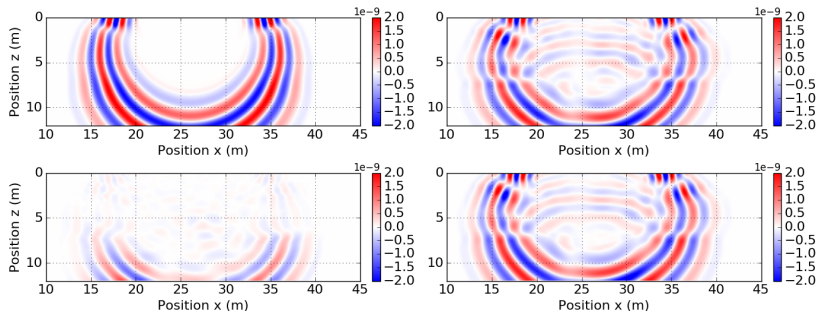
Migration
(=imaging)

Inversion des formes d'onde – problème direct

Approche en deux temps ($f_{max} = 60$ Hz puis $f_{max} = 300$ Hz)

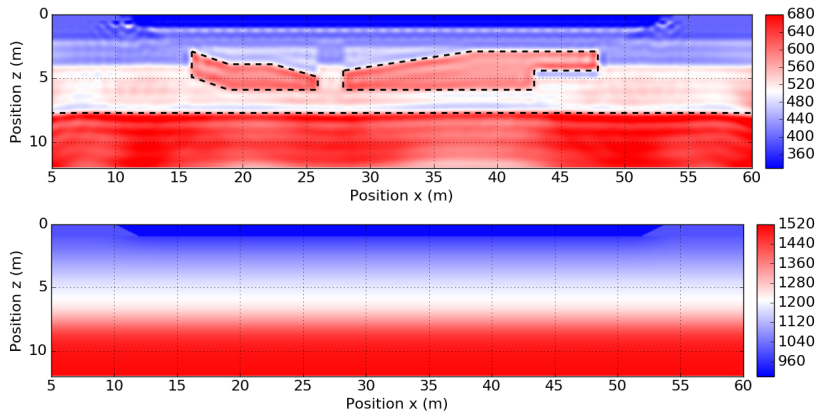
Approche en une étape ($f_{max} = 300$ Hz)

Inversion des formes d'onde – stratégies



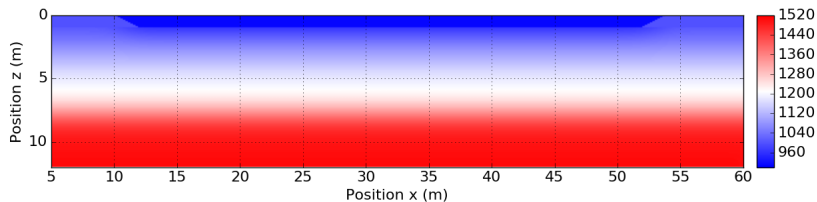
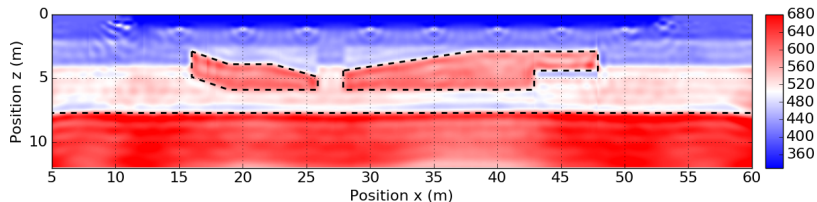
Snapshots (initial, inversé, exact et différences)

Inversion des formes d'onde – stratégies



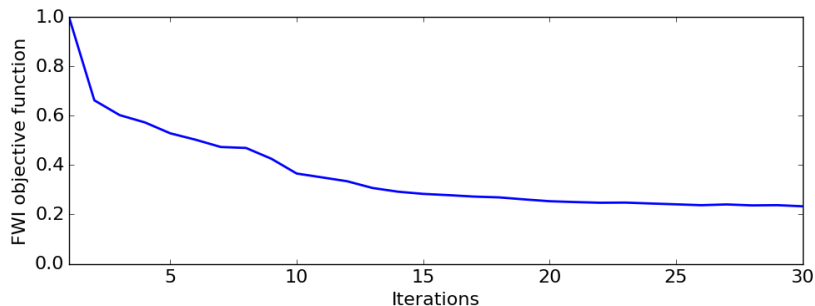
Solution de référence (toutes les sources)

Inversion des formes d'onde – stratégies



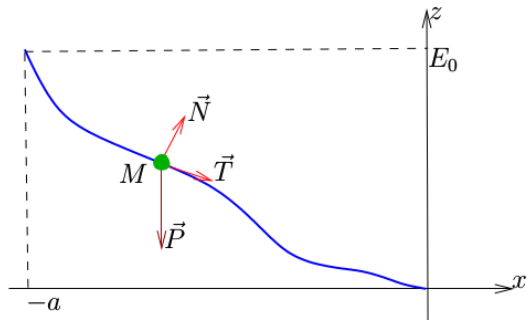
Avec une source sur 5 (tous les 5 m)

Inversion des formes d'onde – stratégies



Forme de la fonction objective (densité)

Introduction – exemple 3



Le toboggan d'Abel