

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Tomographie en  
onde complète

Références

## **GEO1303 – Méthodes sismiques**

### **12 - Tomographie sismique en forage**

Bernard Giroux

(bernard.giroux@ete.inrs.ca)

Institut national de la recherche scientifique  
Centre Eau Terre Environnement

Version 0.9.4  
Automne 2020

**Principes**

Tomographie par  
tracé de ray

Tomographie en  
onde complète

Références

# Principes

# Introduction

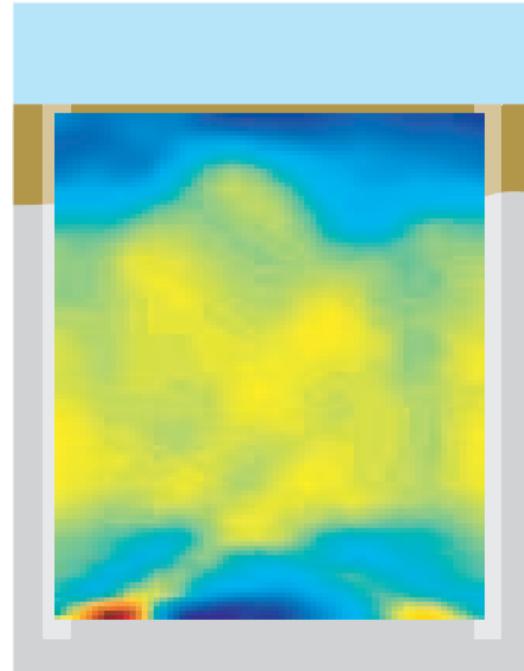
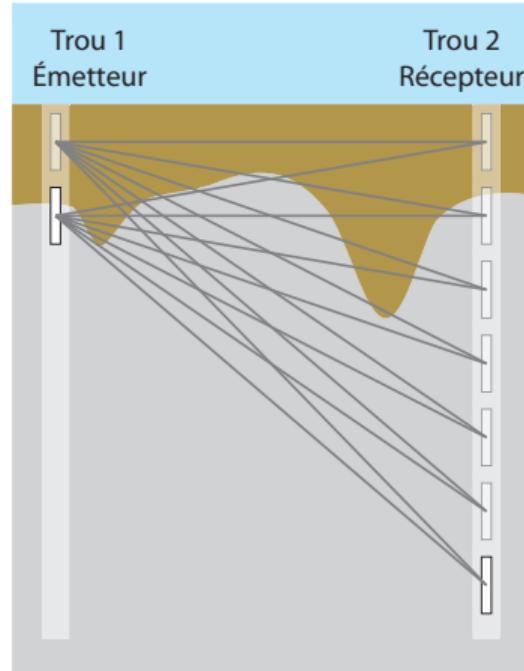
Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Tomographie en  
onde complète

Références

- Tomographie : du grec *tomos* (section) et *graphein* (écrire);
- But : obtenir une image des structures situées entre les forages;



# Deux approches

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Tomographie en  
onde complète

Références

- Tomographie par tracé de rai
  - Basée sur une relation intégrale entre la mesure et la propriété recherchée ;
    - Contenu fréquentiel évacué.
  - Mesure du temps d'arrivée de l'onde directe pour déterminer le champ de vitesse ;
  - Mesure de l'amplitude de l'onde directe pour déterminer le champ d'atténuation.
- Tomographie basée sur l'équation d'onde
  - Résolution spatiale accrue p/r au tracé de rai ;
  - Beaucoup plus lourd sur le plan du temps de calculs et du traitement des données préliminaire.

# Applications

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Tomographie en  
onde complète

Références

- Domaines d'application

- Caractérisation des réservoirs;
- Génie civil/géotechnique;
- Environnement.

# Applications

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Tomographie en  
onde complète

Références

- Avantages

- Selon les conditions de surface, les mesures en forage permettent d'imager des régions autrement inaccessibles;
- Bonne résolution en profondeur;

- Désavantages

- Nécessite des trous relativement rapprochés;
- Acquisition et traitement des données assez long.

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

# Tomographie par tracé de rai

# Relation entre mesure et propriété du sol

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- La tomographie est basée sur une relation intégrale entre la mesure et la propriété recherchée ;
- Ce type de tomographie est basé sur l'utilisation du concept de rai ;
- Prenons l'exemple de la vitesse de propagation  $v$ , ou de son inverse la lenteur  $s$  ( $s = v^{-1}$ ) :
  - le temps de propagation  $t$  entre l'émetteur Tx et le récepteur Rx est

$$t = \int_{Tx}^{Rx} s(l) dl \quad (1)$$

où l'intégration se fait le long du rai  $l$ .



# Relation entre mesure et propriété du sol

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- L'idée est donc de trouver  $s$  à partir de la connaissance de  $t$ ;
- Il faut cependant connaître  $l$ ;
- Le problème est non linéaire car
  - l'intégration de  $s$  se fait le long de  $l$ ;
  - mais  $l$  dépend de  $s$ .
- Solution : processus itératif
  - un modèle initial est construit à partir des informations disponibles (logs de forage);
  - la modélisation par tracé de rai peut alors être réalisée.

# Discrétisation du domaine

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Théorie

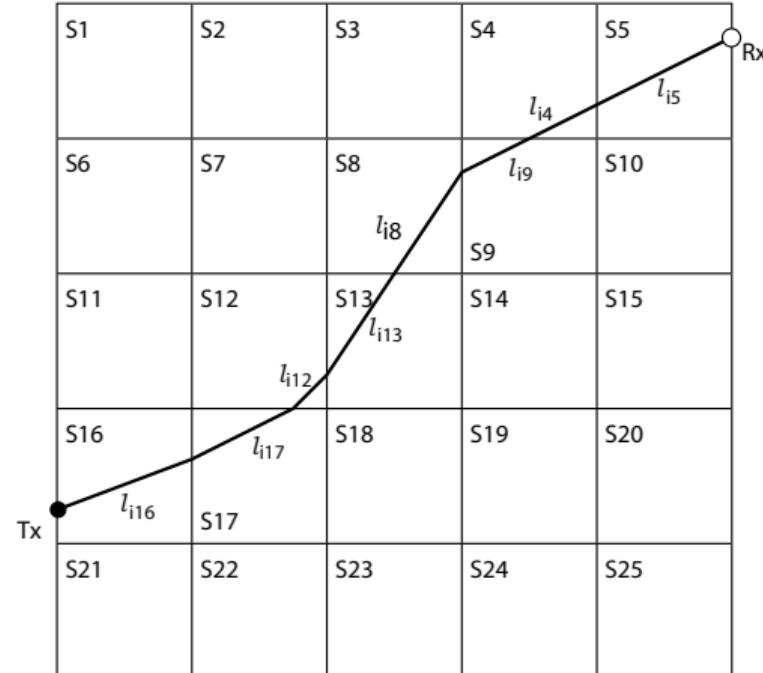
Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Pour faire les calculs, le domaine d'intérêt doit être discréteisé en cellules de lenteur constante



# Forme matricielle

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre  
Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Dans le domaine discret, le rai devient une juxtaposition de segments mis bout à bout;
- Chaque segment a une longueur égale à la portion du rai traversant la cellule;
- Le temps de parcours (1) devient une sommation sur le nombre de segments  $n_{seg}$

$$t = \sum_{j=1}^{n_{seg}} l_j s_j \quad (2)$$

où  $s_j$  correspond à la lenteur de la cellule traversée par  $l_j$ .

- Pour un levé correspondant à  $n_o$  mesures, un système de  $n_o$  équations est construit;
- Si le domaine est composé de  $n_p$  cellules, il y a conséquemment  $n_p$  inconnues au système;

# Forme matricielle

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Les  $n_o$  temps d'arrivée mesurés et  $n_p$  lenteurs inconnues sont regroupés en matrices

$$t = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_{n_o} \end{bmatrix}, \quad s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{n_p} \end{bmatrix} \quad (3)$$

- Une matrice contenant les segments de rais doit être construite :

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1n_p} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2n_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n_o 1} & l_{n_o 2} & \cdots & l_{n_o n_p} \end{bmatrix} \quad (4)$$

# Forme matricielle

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre  
Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Le système à résoudre s'écrit donc

$$Ls = t. \quad (5)$$

- Propriétés de la matrice  $L$

- elle n'est jamais carrée, i.e.  $n_o \neq n_p$ , et en général  $n_o < n_p$ ;
- elle est creuse, i.e. pour un rai  $i$ , certaines cellules ne sont pas traversées et les éléments de la  $i^e$  ligne correspondant à ces cellules sont des zéros;
- Certaines cellules sont traversées par plusieurs rais (problème sur-déterminé);
- Certaines cellules peuvent n'être traversées par aucun rai (problème sous-déterminé);
- Le système est dit « mal posé ».

# Solution – moindres carrés

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Théorie

Mise en œuvre  
Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- La solution la plus courante au système (5) passe par une variante ou une autre des moindres carrés;
- Soit l'erreur entre le vecteur observé  $t$  et le vecteur modélisé  $Ls$  :

$$e = t - Ls. \quad (6)$$

- L'objectif est de trouver le minimum de

$$e^T e = (t - Ls)^T (t - Ls); \quad (7)$$

- À ce minimum, la dérivé de (7) par rapport à  $s$  est égale à zéro

$$\frac{\partial(e^T e)}{\partial s_j} = 2 [L^T(t - Ls)]_j = 0, \quad j = 0, \dots, n_p. \quad (8)$$

- Sous forme matricielle

$$L^T L \hat{s} = L^T t. \quad (9)$$

# Solution – moindres carrés

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Théorie

Mise en œuvre  
Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Pour solutionner (9), l'inverse de  $L^T L$  doit être calculée

$$\hat{s} = (L^T L)^{-1} L^T t \quad (10)$$

- Mais  $L^T L$  est singulière ou quasi-singulière, et de taille imposante ( $n_p \times n_p$ );
- Une solution : « régulariser » le problème;
- La norme à minimiser devient

$$\|Ls - t\| + \lambda \|Ds\| \quad (11)$$

où  $\lambda$  est un pondérateur lagrangien;

- Le terme  $D$  peut prendre plusieurs formes
  - en général,  $D$  correspond à la dérivée spatiale de la lenteur, ce qui impose un lissage du modèle.

# Solution – Algorithmes

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Plusieurs algorithmes ont été développés pour résoudre le problème tomographique
  - rétro-projection;
  - ART;
  - SIRT;
  - CG;
  - LSQR.
- Une revue de ces algorithmes se trouve dans Gloaguen (2004) et Hardage (1992).

# Solution – Géostatistique

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Le pondérateur lagrangien  $\lambda$  doit être déterminé par essai/erreur (méthodes automatiques peu robustes ou très coûteuses en calcul);
- On peut s'affranchir de  $\lambda$  en travaillant avec le modèle de covariance, c'est l'approche géostatistique :
  - la covariance des données est calculée  $C_t = t t^T$ ;
  - $C_t$  est reliée à la covariance du modèle  $C_s$

$$C_t = L C_s L^T + C_0 \quad (12)$$

où  $C_0$  représente la variance sur la mesure;

- avec (12), on peut déterminer  $C_s$ ;
- on peut alors calculer la covariance entre les temps et les lenteurs :

$$C_{ts} = L C_s. \quad (13)$$

# Solution – Géostatistique

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Connaissant  $C_{ts}$ , on peut cokriger la lenteur à partir des temps;
- Les poids de krigage sont

$$\Lambda = (C_t)^{-1} C_{ts}. \quad (14)$$

- Le modèle de lenteur krigé est finalement

$$Z_g = \Lambda^T t. \quad (15)$$

- Par sa nature, l'opérateur de krigage produit des modèles lisses.
- Il est possible d'obtenir des modèles plus «rugueux» grâce à la simulation géostatistique
  - la variabilité est définie par le modèle de covariance  $C_s$ ;
  - la variabilité est supportée par les données puisque  $C_s$  est déterminé à partir de  $C_t$ .

# Solution – Géostatistique

Principes

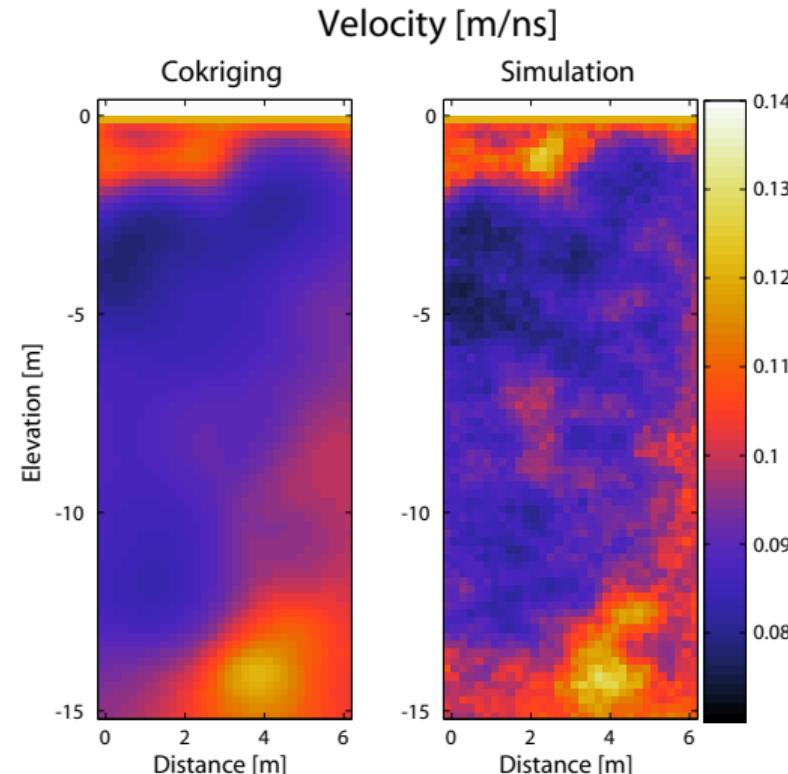
Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre  
Applications

Tomographie en  
onde complète

Références



# Tracé de rais

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre  
Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- La construction de la matrice  $L$  implique que le trajet du rai est connu;
- Certains algorithmes considèrent que les rais sont droits
  - le trajet est alors une simple droite entre Tx et Rx;
  - approximation valide si les variations de vitesses sont faibles.
- Cependant, si le contraste de vitesse est élevé, il faut considérer que le rai s'infléchit (principe de Fermat);
- Algorithmes de modélisation du tracé de rai :
  - algorithmes « à deux points »
    - modélisation par inflexion des rais (*ray bending*);
    - modélisation par méthode des tirs (*ray shooting*);
  - algorithmes à domaine complet (Leidenfrost et al., 1999)
    - différences finies;
    - méthode des graphes;
    - méthode de construction du front d'onde;
    - *Fast marching, fast sweeping*.

# Tracé de rais

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

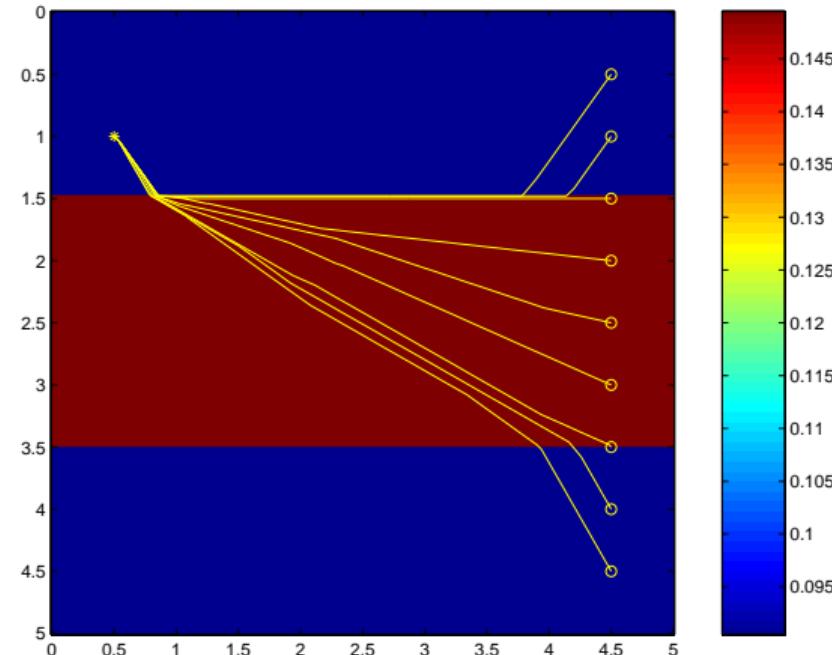
Théorie

Mise en œuvre  
Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- En général en géophysique, l'approximation du rai droit n'est pas valide



# Tomographie d'atténuation

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- La mesure de l'amplitude  $A$  permet de retrouver l'atténuation  $\alpha$ ;
- L'amplitude mesurée au récepteur est fonction de plusieurs paramètres

$$A = \frac{A_0 e^{-\int \alpha(l) dl} \Gamma_e(\theta_e) \Gamma_r(\theta_r)}{\int dl} \quad (16)$$

où

- $1/\int dl$  est la correction de la divergence géométrique;
- $A_0$  est l'amplitude initiale;
- $l$  représente le rai;
- $\Gamma_e(\theta_e)$  est un facteur de correction du diagramme de rayonnement de l'émetteur;
- $\Gamma_r(\theta_r)$  est un facteur de correction du gain directionnel du récepteur.
- L'idée est de sortir  $\alpha$  de l'équation (16).

# Tomographie d'atténuation

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

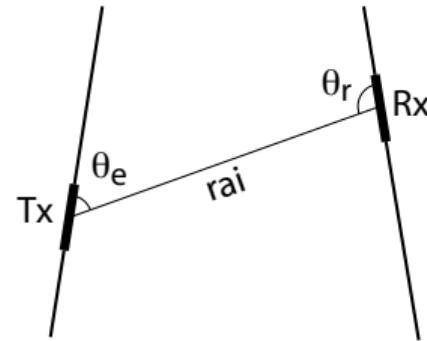
Théorie

Mise en œuvre  
Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Difficultés :  $A_0$ ,  $\Gamma_e$  et  $\Gamma_r$  peuvent être difficiles à connaître/estimer;
- Le problème peut être évité en travaillant avec les spectres d'amplitude (Quan and Harris, 1997);
- Ou alors,  $\Gamma_e$  et  $\Gamma_r$  sont approximés par une fonction sinus ( $\sin \theta_e$  et  $\sin \theta_r$ );



- Sous forme discrète, l'équation (16) devient, pour le  $i^e$  rai

$$A_i = \frac{A_0 e^{-\sum_j \alpha_j l_{ij}} \sin \theta_e \sin \theta_r}{\sum_j l_{ij}} \quad (17)$$

# Tomographie d'atténuation

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Théorie

Mise en œuvre  
Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- L'équation (17) peut se récrire

$$A_0 e^{-\sum_j \alpha_j l_{ij}} = \frac{A_i \sum_j l_{ij}}{\sin \theta_e \sin \theta_r}, \quad (18)$$

dont  $\alpha$  peut être isolé en prenant le logarithme

$$\sum_j \alpha_j l_{ij} = \ln \left( \frac{A_i \sum_j l_{ij}}{\sin \theta_e \sin \theta_r} \right) - \ln(A_0). \quad (19)$$

- En général, on assume que  $A_0$  est constant pour tout le levé, on le détermine par une régression linéaire ;
- On obtient finalement, sous forme matricielle

$$L\alpha = A, \quad (20)$$

où  $A$  contient dans ce cas les amplitudes corrigées (terme de droite de (19)).

# Sources

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

● Plusieurs types de source peuvent être utilisés :

- explosives : cartouches (*air-gun, water-gun*);
- à impact;
- *sparker, piezoélectrique.*



source à impact

# Couverture et résolution

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

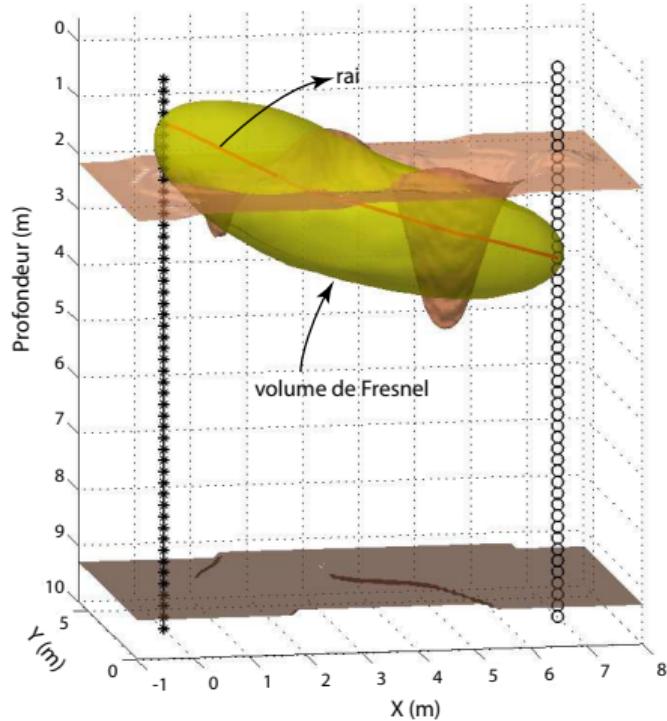
Tomographie en  
onde complète

Références

- La qualité de l'image obtenue par tomographie dépend
  - de la couverture de mesure;
  - de la fréquence nominale de l'onde transmise.
- De fait, la résolution est dictée par la zone de Fresnel en transmission, située à l'intérieur de

$$|t_{Tx,r} + t_{Rx,r} - t_{Tx,Rx}| \leq \frac{1}{2f}, \quad (21)$$

où  $f$  est la fréquence,  $t_{a,b}$  est le temps de parcours entre  $a$  et  $b$ , et  $r$  est un point arbitraire.



# Couverture et résolution

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

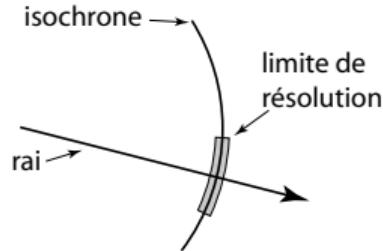
Mise en œuvre

Applications

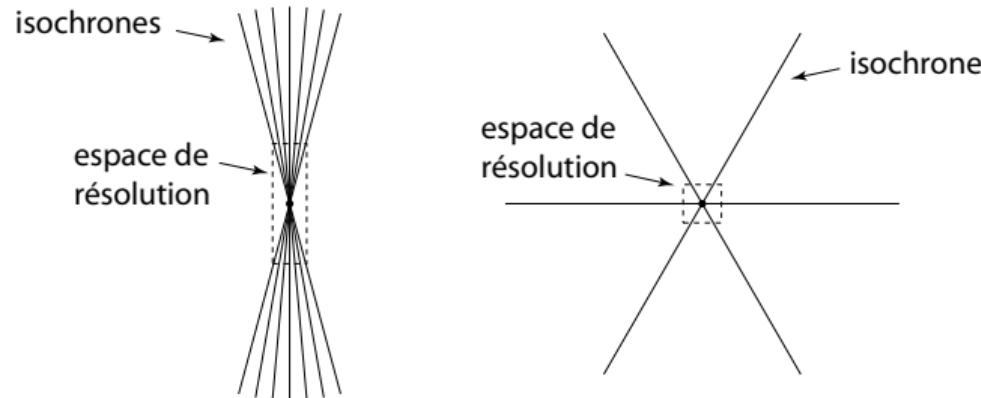
Tomographie en  
onde complète

Références

- La résolution est meilleure dans la direction du rai, que le long de l'isochrone (surface  $\perp$  au rai);



- Ainsi, la couverture angulaire d'un objet déterminera la capacité à le résoudre



# Couverture et résolution

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Le calcul de la résolution admissible dépend donc de plusieurs facteurs et est relativement complexe;
- D'après Schuster (1996), pour deux trous espacés de  $2x_0$  et de longueur  $L$ 
  - la résolution verticale est proportionnelle à  $\sqrt{\lambda x_0}$ ;
  - la résolution horizontale vaut  $(4x_0/L)\sqrt{3x_0\lambda/4}$ ;où  $\lambda$  est la longueur de l'onde transmise.

# Couverture et résolution

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

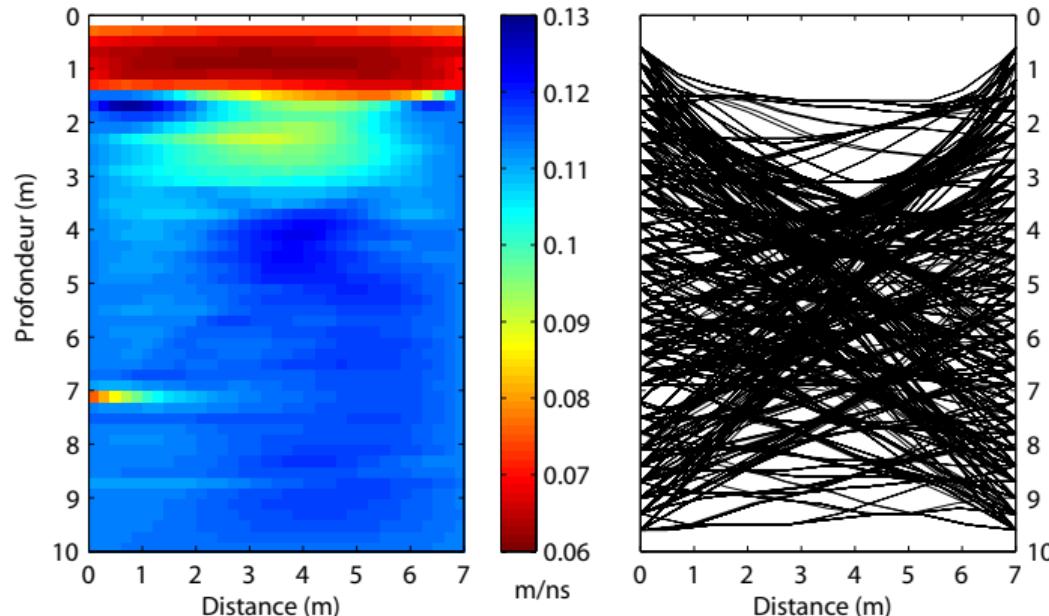
Théorie

Mise en œuvre  
Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- La résolution est donc fonction du nombre de rayons qui traverse la région ;
- Rayons courbes, les zones de faibles vitesses sont moins bien résolues (important d'inclure les rayons dans la présentation des résultats)



# Couverture et résolution

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Cas extrême : si seulement des rayons horizontaux sont mesurés, alors seulement un milieu tabulaire pourra être résolu.
- L'utilisation d'une source en surface avec des capteurs en trous de forage permet de mieux résoudre des objets verticaux
  - dans la pratique, cela peut poser des problèmes techniques.

# Considérations pratiques

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- La position des trous et leur déviation doit être connue avec précision
  - plus les trous sont rapprochés, plus l'erreur sur la vitesse sera grande;
- La synchronisation et la dérive du temps initial ( $t_0$ ) doit être mesurée et corrigée.
- Le même compromis entre résolution et pénétration rencontrée avec les méthodes de surface a lieu avec les méthodes en forage.

# Traitements des données

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

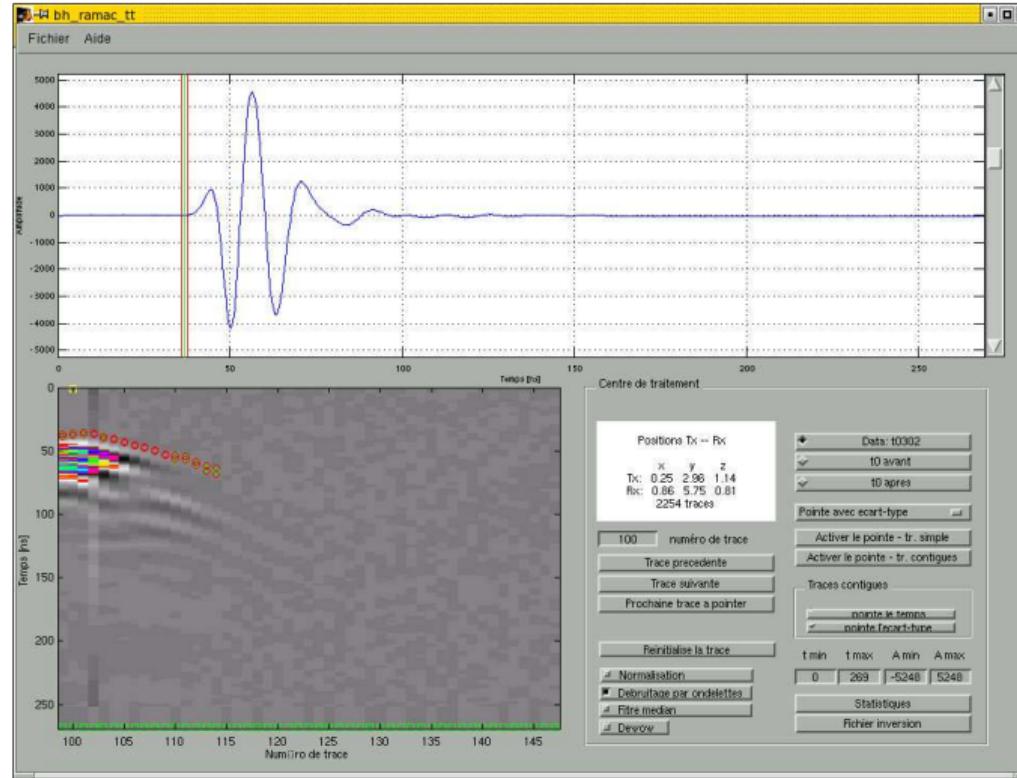
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références



# Ondes de tube

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Des contrastes d'impédance le long des puits génèrent des ondes de tube ;
- Les ondes de tube se propagent des puits remplis d'un fluide ;
- L'onde de tube est une onde d'interface apparaissant en présence d'une interface cylindrique entre deux milieux ;
- L'amplitude des ondes de tube est souvent plus élevée que celle des ondes P ou S – elles peuvent contaminer considérablement les données.

# Ondes de tube

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

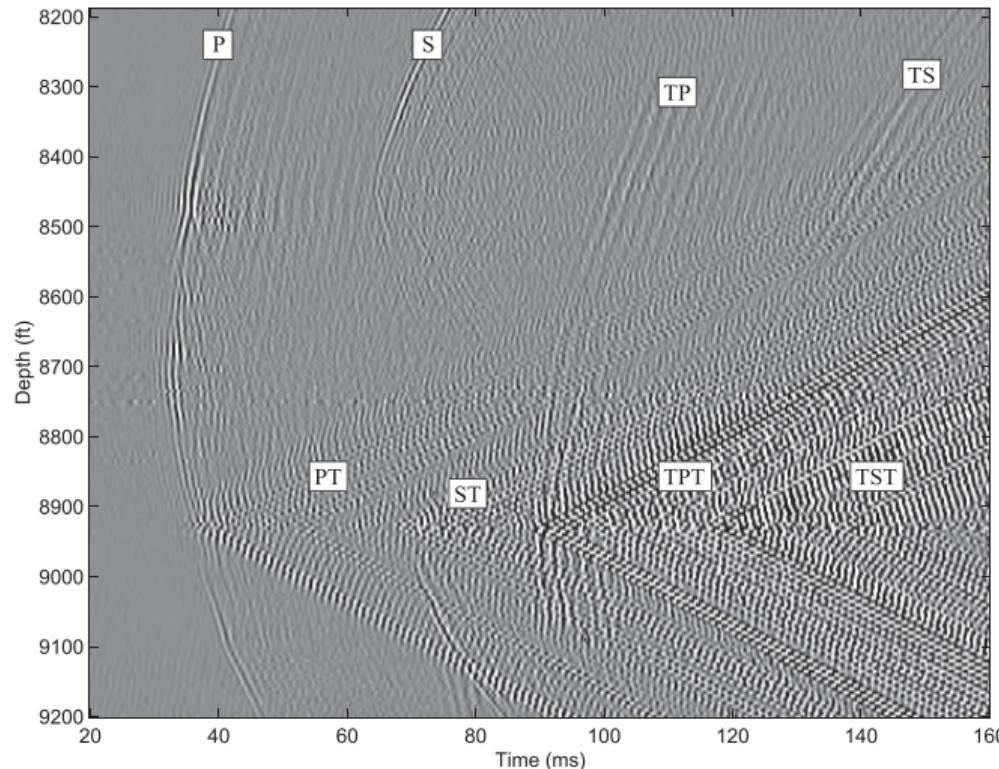
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références



# Ondes de tube

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

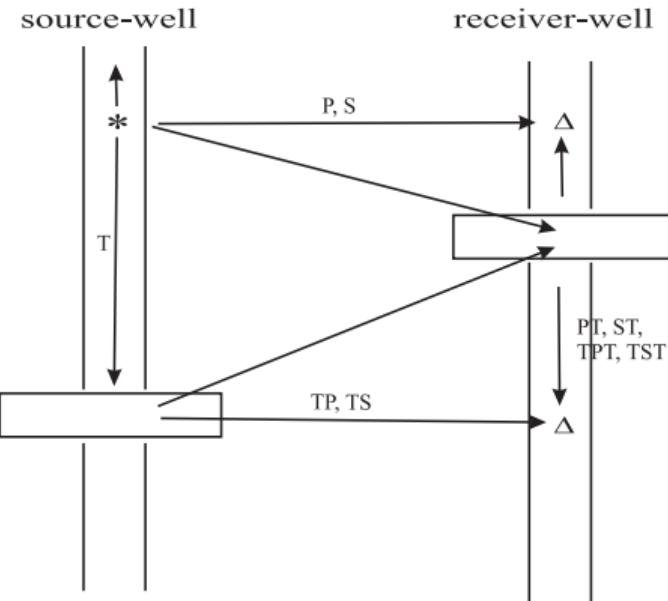
Théorie

Mise en œuvre

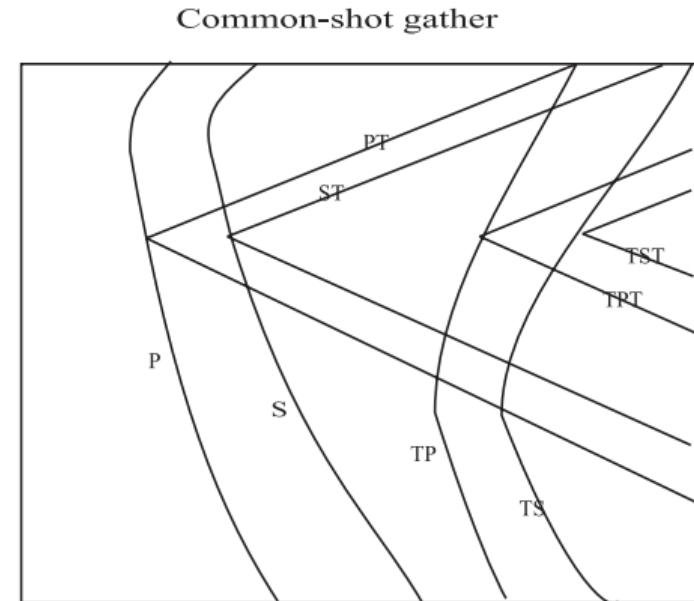
Applications

Tomographie en  
onde complète

Références



(a)



(b)

# Environnement

Principes

Tomographie par  
tracé de rayon

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Daley, T. M., Majer, E. L., and Peterson, J. E. (2004). Crosswell seismic imaging in a contaminated basalt aquifer. *Geophysics*, 69(1) :16–24
- Imagerie de zones fracturées dans un aquifère;
- Les fractures sont des chemins d'écoulement où transitent des contaminants provenant d'un dépotoir;
- Les zones fracturées sont associées à des vitesses sismiques faibles et des atténuations élevées;

# Environnement

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

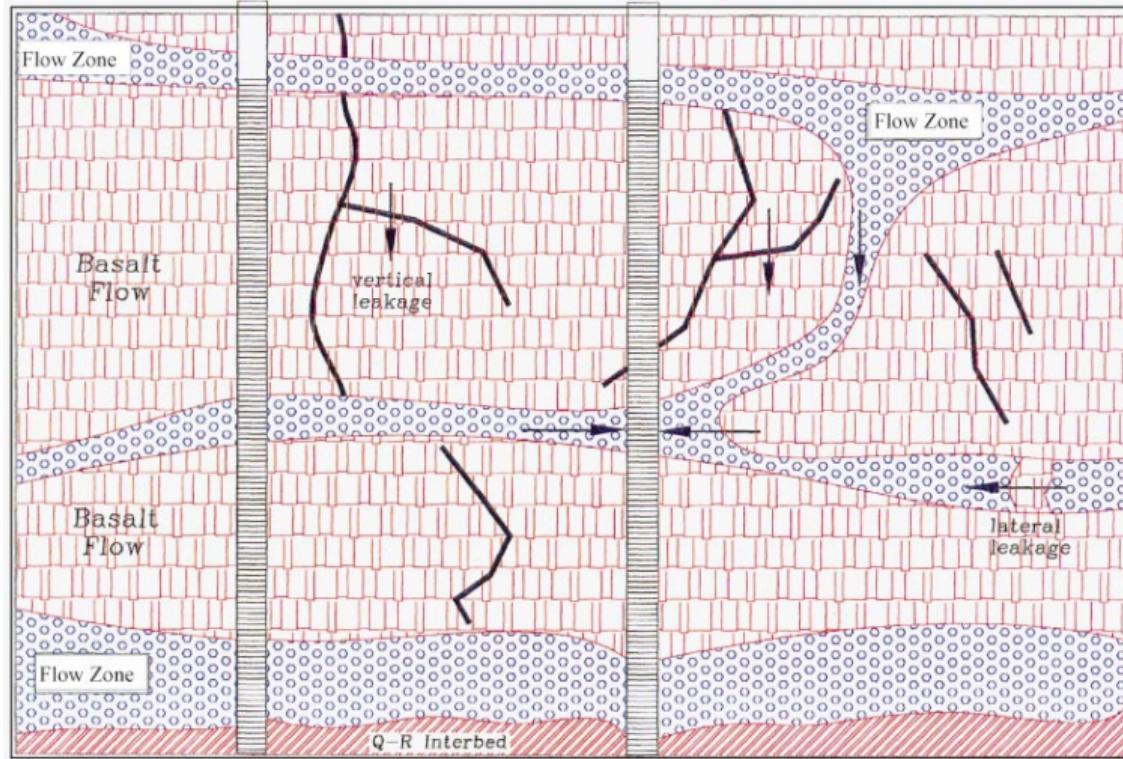
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références



# Environnement

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

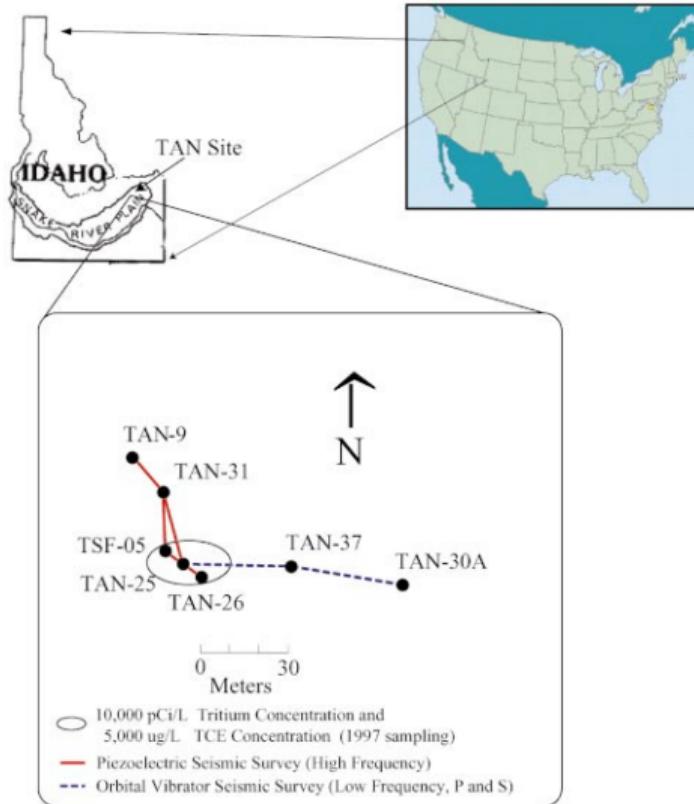
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références



# Environnement

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références

- Deux types de source, développées au LBNL
- Piézoélectrique
  - 800 – 10,000 Hz
  - source impulsive
  - portée : entre 10 et 20 m
  - 25 tirs sommées par position de tir pour rehausser S/B
- Vibrateur orbital
  - 70 – 400 Hz
  - génère des ondes P et S
  - portée : 57 m et plus
- Hydrophones utilisés comme capteurs
- Séparation des sources & hydrophones : 0.5 m

# Environnement

Principes

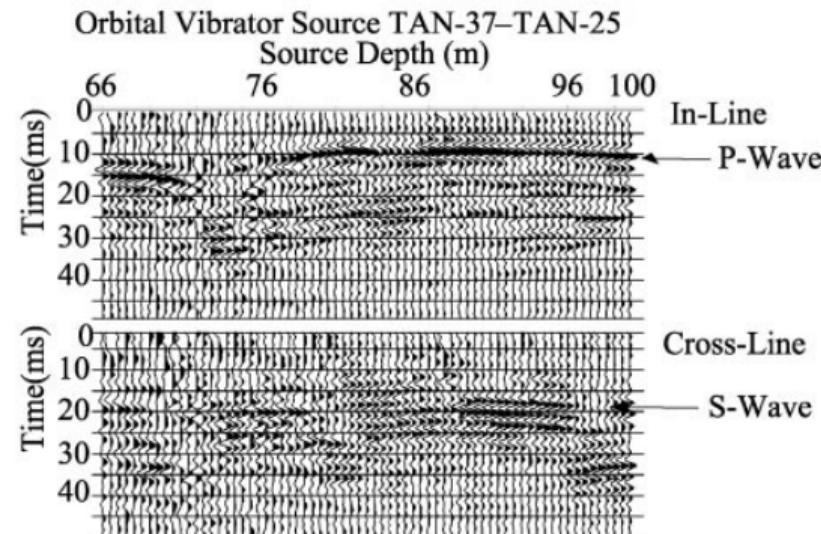
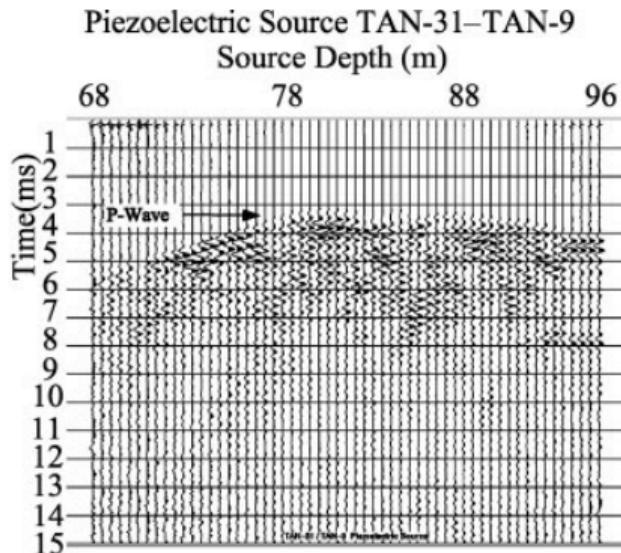
Tomographie par  
tracé de ray

Théorie

Mise en œuvre  
Applications

Tomographie en  
onde complète

Références



# Environnement

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

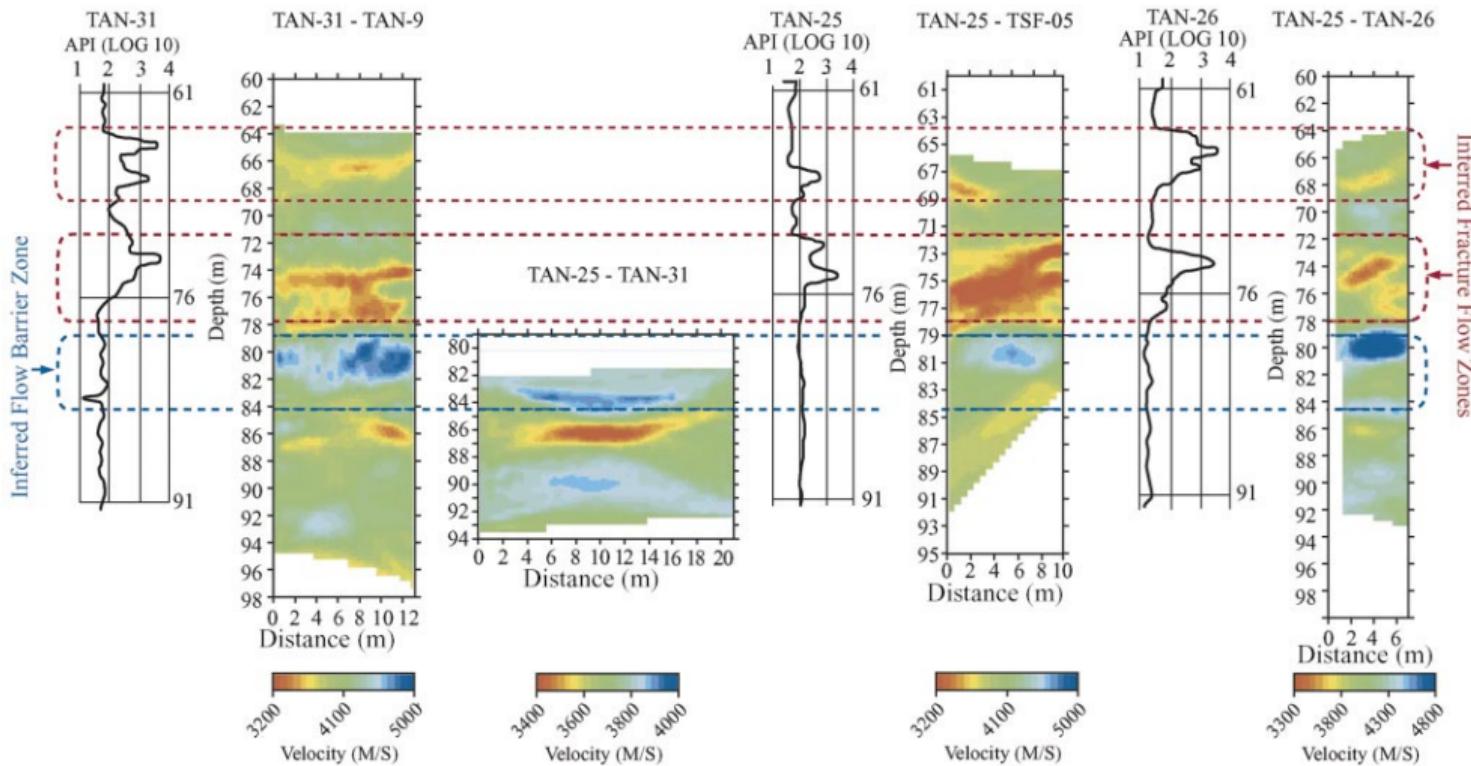
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références



# Environnement

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

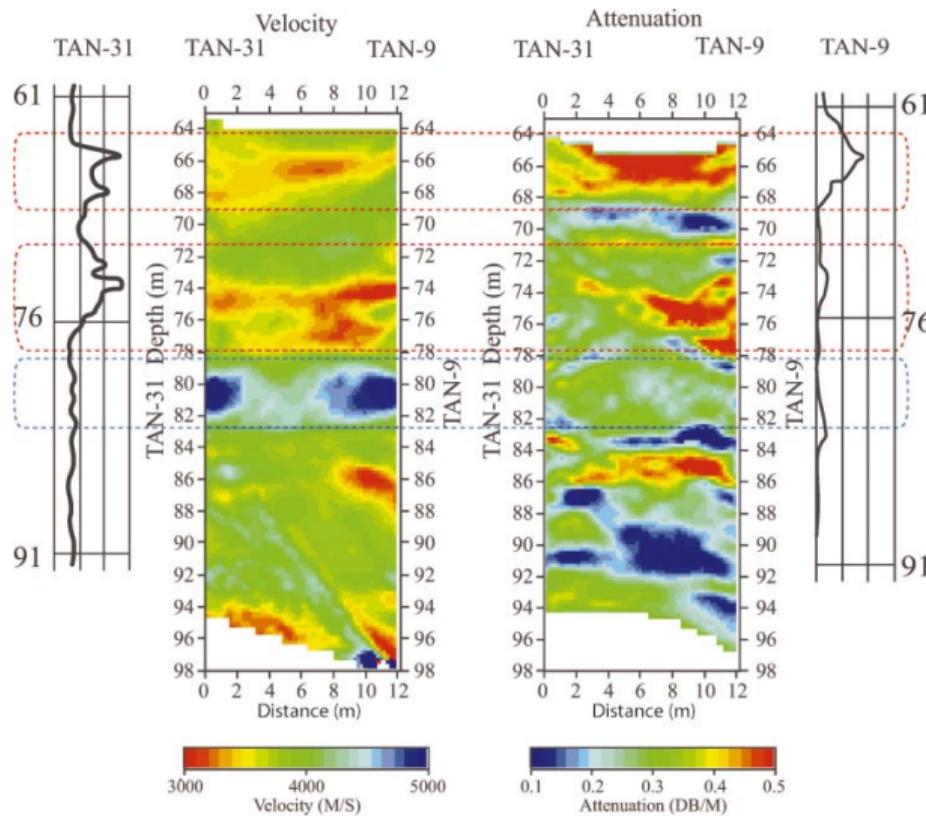
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en  
onde complète

Références



Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Tomographie en  
onde complète

Théorie

Applications

Références

# Tomographie en onde complète

# Principes

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Tomographie en  
onde complète

Théorie  
Applications

Références

- On cherche un modèle qui permet d'ajuster le sismogramme, en partie ou en totalité;
- On doit donc modéliser le sismogramme (modèle direct), i.e. ne pas se limiter aux temps d'arrivée;
- On peut utiliser différentes formes
  - Approximation acoustique (ondes P,  $\mu=0$ )

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{f} + \lambda \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u})$$

- Milieu élastique (ondes P et S)

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{f} + (\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) - \mu \nabla \times (\nabla \times \mathbf{u})$$

- Milieu viscoacoustique ou viscoélastique
  - Atténuation prise en compte via des propriétés et vitesses comportant un terme complexe ( $v_c = v_r + iv_i$ );
  - Facteur de qualité sismique  $Q = \text{Re}(v_c^2)/\text{Im}(v_c^2)$ .

# Calcul du modèle direct

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Tomographie en  
onde complète

Théorie

Applications

Références

- Domaine du temps

- Différences finies (FDTD) : dérivées spatiales calculées par DF;
- Méthode pseudospectrale (PSTD) : dérivée spatiales calculées dans le domaine de Fourier;

- Domaine des fréquences

- On travaille avec la transformée de Fourier des signaux

$$\rho\omega^2\hat{\mathbf{u}} = \hat{\mathbf{f}} + (\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot \hat{\mathbf{u}}) - \mu\nabla \times (\nabla \times \hat{\mathbf{u}});$$

- Avantageux sur le plan du calcul numérique;

- On travaille avec un nombre fini de fréquences  $\omega$ ;
- Formalisme adapté au problème inverse.

# Choix de la fonction à minimiser

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Tomographie en  
onde complète

Théorie

Applications

Références

- Soit un sismogramme (une trace)  $p(x_r, t|x_s)_o$  enregistré à  $x_r$  consécutif à un tir à  $x_s$ ;
- Le résidu du sismogramme au temps  $t$  est noté

$$\delta p_{rs}(t) = p(x_r, t|x_s)_o - p(x_r, t|x_s)_c, \quad (22)$$

où  $p(x_r, t|x_s)_c$  est la trace calculée;

- On cherche à minimiser le résidu, i.e.

$$E = \sum_s \sum_r \int [\delta p_{rs}(t)]^2 dt. \quad (23)$$

# Choix de la fonction à minimiser

Principes

Tomographie par  
tracé de rais

Tomographie en  
onde complète

Théorie

Applications

Références

- Problème avec  $E$  de l'éq. (23) : non linéarité vis-à-vis du modèle de vitesse → problème de convergence;
- Fonction «hybride» : on inclut le résidu du temps d'arrivée
  - Soit le temps d'arrivée de l'onde directe observée  $\tau(x_r, x_s)_o$  et calculée  $\tau(x_r, x_s)_c$ , le résidu vaut

$$\delta\tau_{rs} = \tau(x_r, x_s)_o - \tau(x_r, x_s)_c;$$

- La fonction hybride est alors

$$E = \frac{1}{2} \sum_s \sum_r \left( (1 - \alpha)[\delta\tau_{rs}]^2 + \alpha \int [\delta p_{rs}(t)]^2 dt \right), \quad (24)$$

où  $\alpha$  permet de pondérer un terme par rapport à l'autre.

- Modèle de vitesse initial très important : souvent obtenu par tomo par tracé de rais.

# Pré-traitement des données

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Tomographie en  
onde complète

Théorie

Applications

Références

- Séquences de traitement typiques peuvent inclure
  - Élimination des ondes de tube;
  - Élimination des réflexions à l'interface air-sol;
  - Fenêtrage de l'arrivée directe et des premières millisecondes (ondes P, approximation acoustique);
  - Extraction de la fonction source;
  - Lorsque le modèle directe est 2D :
    - Transformation de la phase par  $\pi/4$  et mise à l'échelle de  $1/\sqrt{\omega}$  pour corriger le rayonnement 3D.

# Délinéation d'une faille

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Tomographie en  
onde complète

Théorie

Applications

Références

- Pratt, R. G. and Shipp, R. M. (1999). Seismic waveform inversion in the frequency domain, part 2 : Fault delineation in sediments using crosshole data. *Geophysics*, 64(3) :902–914;
- Objectif : imager une faille dans des roches sédimentaires ;
- Modèle direct :
  - Approximation viscoacoustique ;
  - $Q$  constant sur le domaine ;
  - Domaine des fréquences ;

# Délinéation d'une faille

Principes

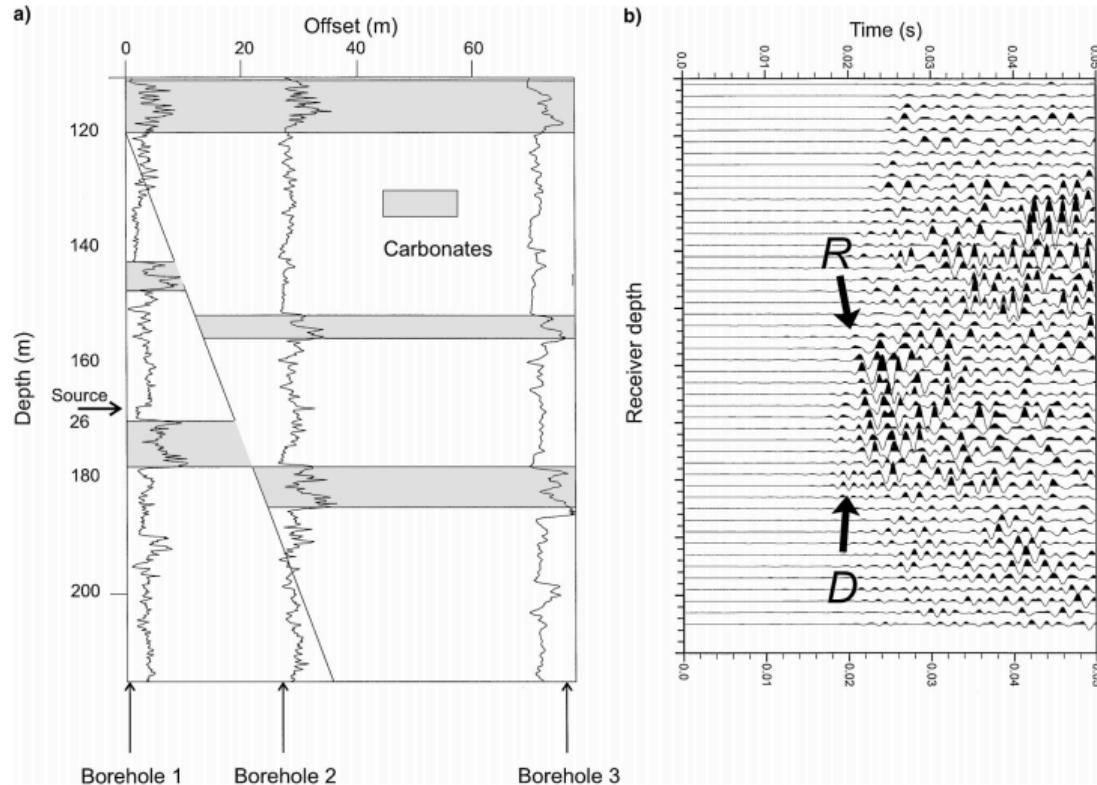
Tomographie par  
tracé de rai

Tomographie en  
onde complète

Théorie

Applications

Références



# Délinéation d'une faille

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

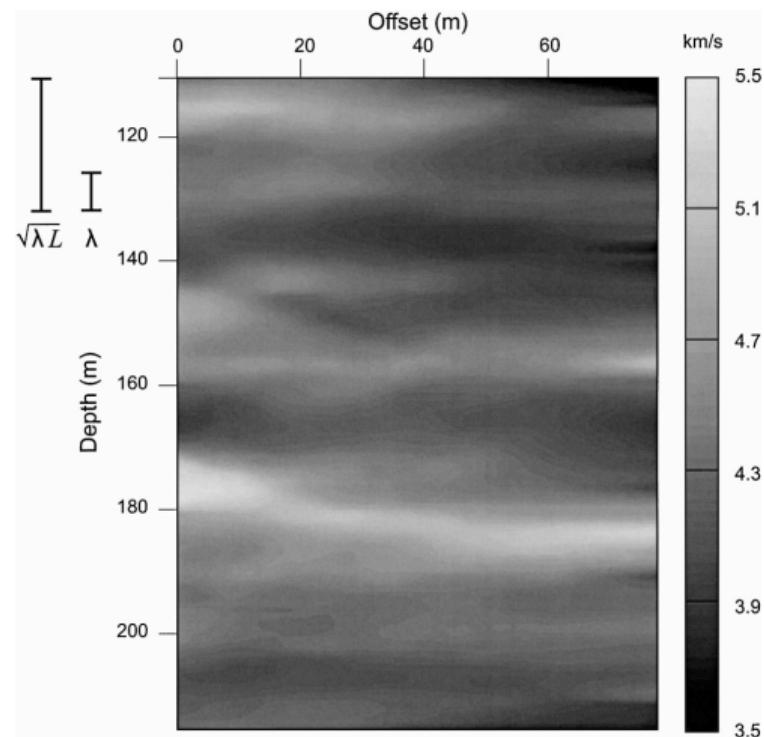
Tomographie en  
onde complète

Théorie

Applications

Références

- Tomogramme de vitesse obtenu par tracé de rais



# Délinéation d'une faille

Principes

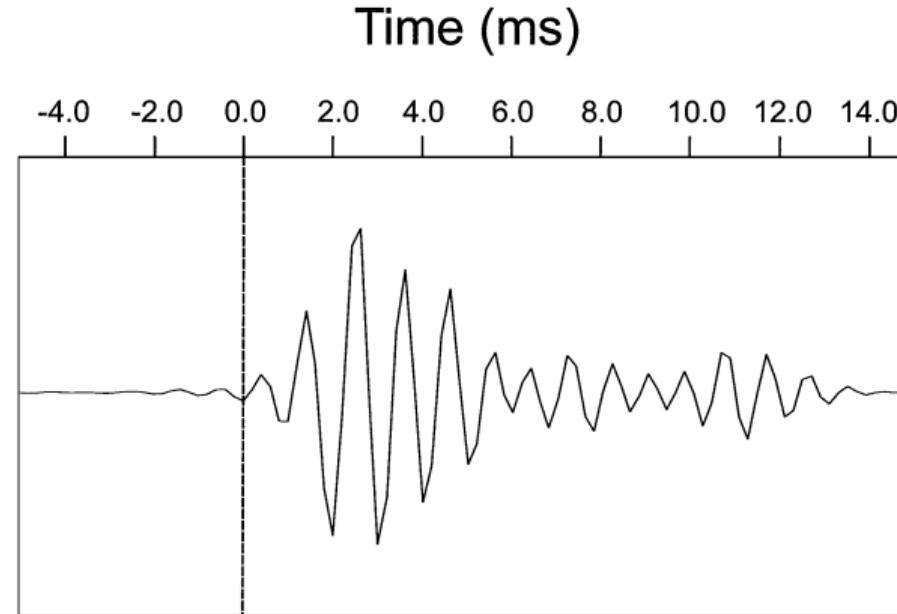
Tomographie par  
tracé de ray

Tomographie en  
onde complète

Théorie  
Applications

Références

- Signature de la source obtenue par déconvolution.



# Délinéation d'une faille

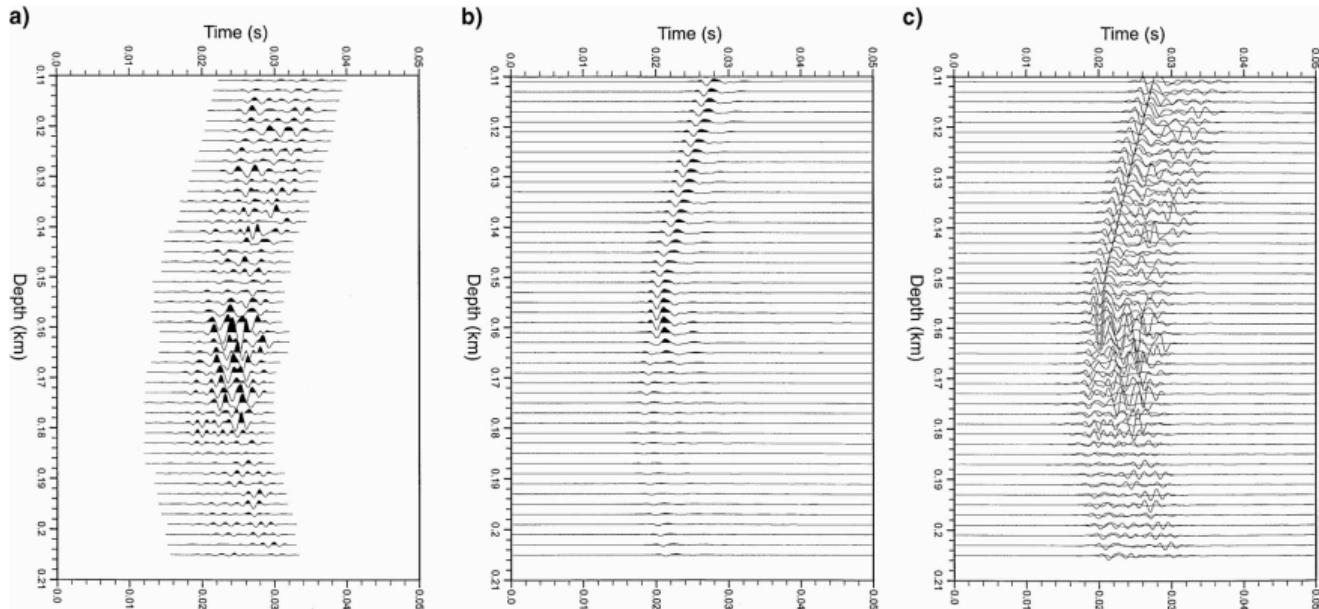
Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Tomographie en  
onde complète

Théorie  
Applications

Références



- a) Données après fenêtrage;
- b) Sismogrammes modélisés avec le modèle obtenu par tracé de rais;
- c) Sismogrammes a) et b) superposés.

# Délinéation d'une faille

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

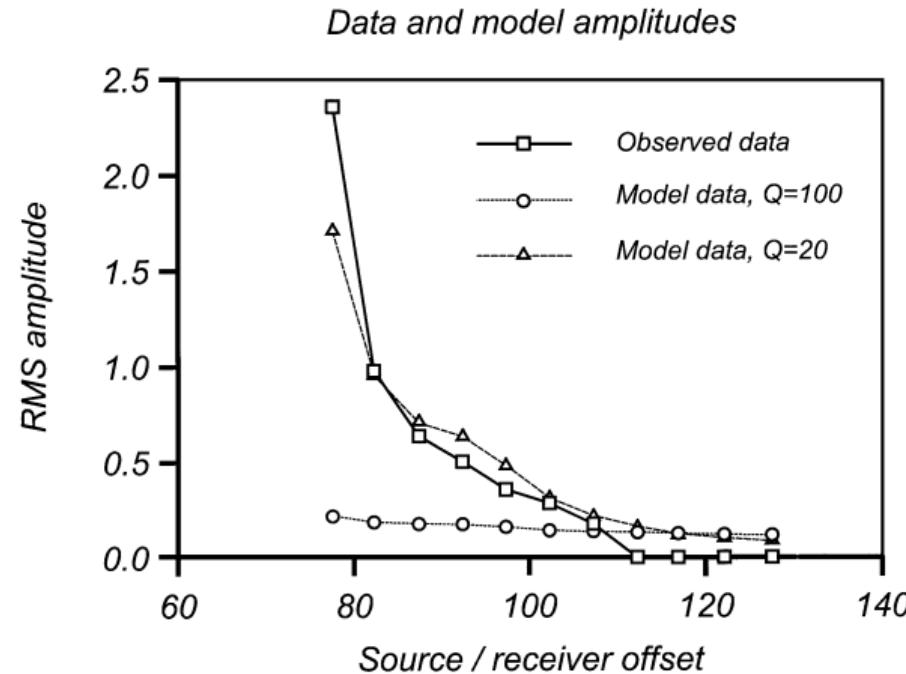
Tomographie en  
onde complète

Théorie

Applications

Références

- Détermination du facteur de qualité  $Q$
- Amplitudes des traces synthétiques contrôlées par ajustement du terme source.



# Délinéation d'une faille

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

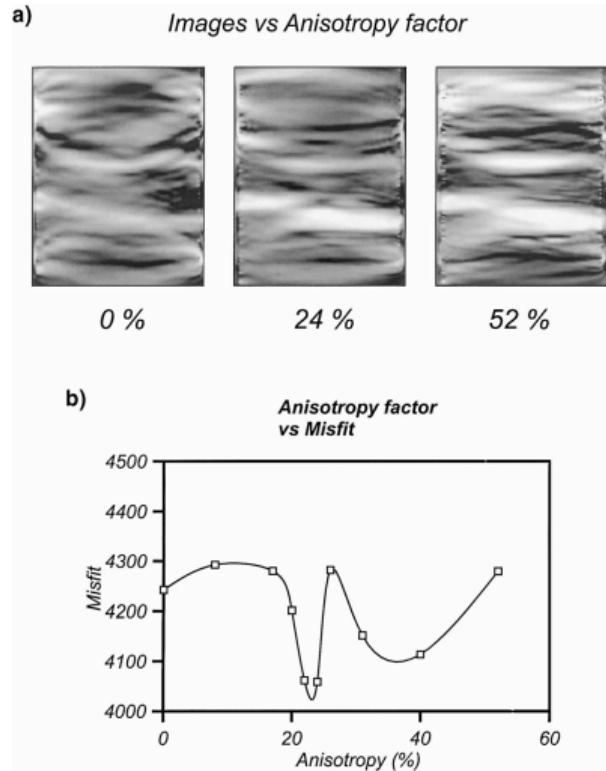
Tomographie en  
onde complète

Théorie

Applications

Références

- Anisotropie observée ;
- Prise en compte en «étirant» une dimension ;
- Anisotropie de 24% utilisée.



# Délinéation d'une faille

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

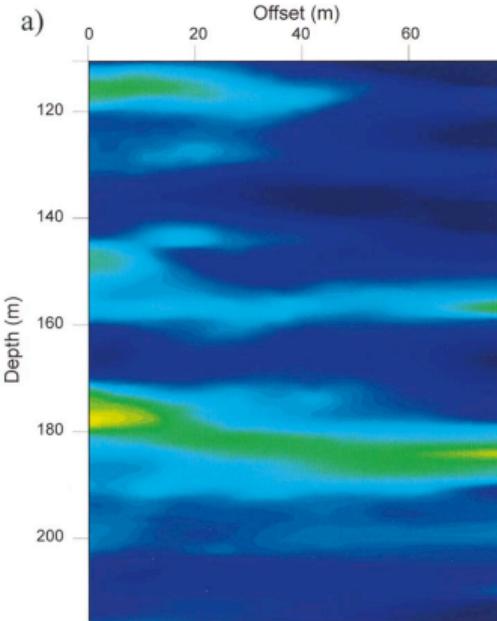
Tomographie en  
onde complète

Théorie

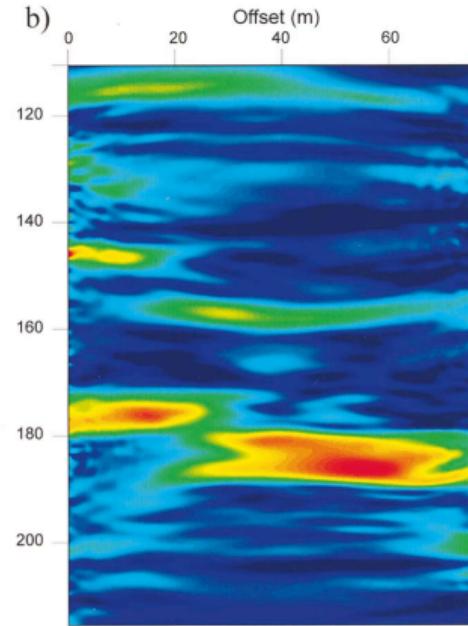
Applications

Références

## Tracé de rais



## Viscoacoustique



3.9                  4.3                  4.7                  km/s                  5.1                  5.5                  5.9

# Délinéation d'une faille

Principes

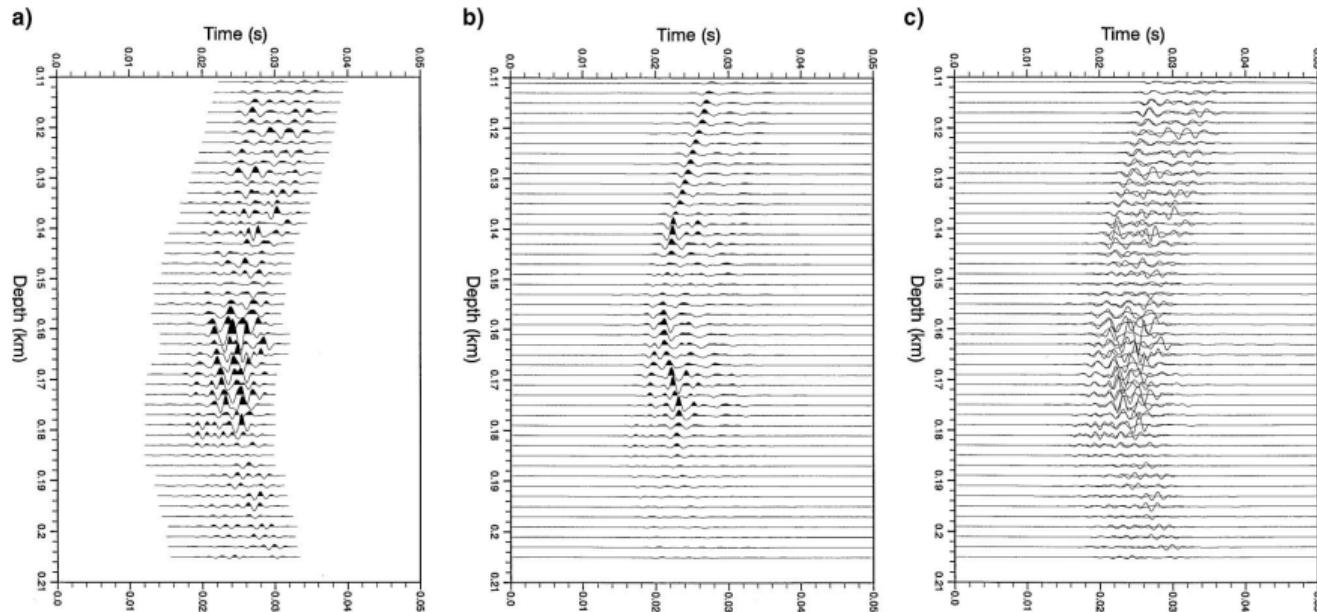
Tomographie par  
tracé de ray

Tomographie en  
onde complète

Théorie

Applications

Références



- a) Données après fenêtrage;
- b) Sismogrammes modélisés avec le modèle viscoacoustique;
- c) Sismogrammes a) et b) superposés.

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Tomographie en  
onde complète

Références

## Références

# Références

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Tomographie en  
onde complète

Références

- Gloaguen, E. (2004). *Tomographie de radar en forage*. PhD thesis, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC;
- Hardage, B. A. (1992). *Crosswell seismology and reverse VSP*. Geophysical Press;
- Leidenfrost, A., Ettrich, N., Gajewski, D., and Kosloff, D. (1999). Comparison of six different methods for calculating traveltimes. *Geophysical Prospecting*, 47 :269–297;

# Références

Principes

Tomographie par  
tracé de ray

Tomographie en  
onde complète

Références

- Pratt, R. G. and Shipp, R. M. (1999). Seismic waveform inversion in the frequency domain, part 2 : Fault delineation in sediments using crosshole data. *Geophysics*, 64(3) :902–914;
- Quan, Y. and Harris, J. M. (1997). Seismic attenuation tomography using the frequency shift method. *Geophysics*, 62 :895–905;
- Schuster, G. T. (1996). Resolution limits for crosswell migration and travelttime tomography. *Geophysical Journal International*, 127 :427–440.