

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

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 0.9.2  
Automne 2015

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Tomographie en onde  
complète

Références

# Principes

# Introduction

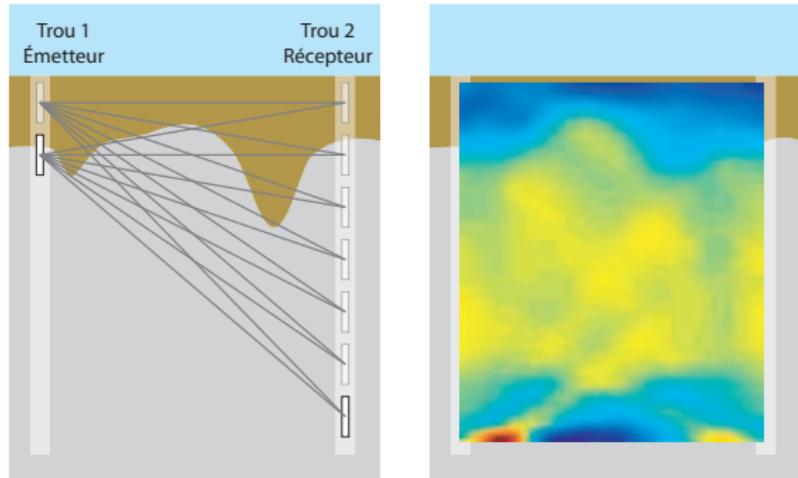
Principes

Tomographie par  
tracé de rai

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 rai

Tomographie en onde  
complète

Références

- Domaines d'application
  - Caractérisation des réservoirs ;
  - Génie civil/géotechnique ;
  - Environnement.

# Applications

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

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 rai

Théorie

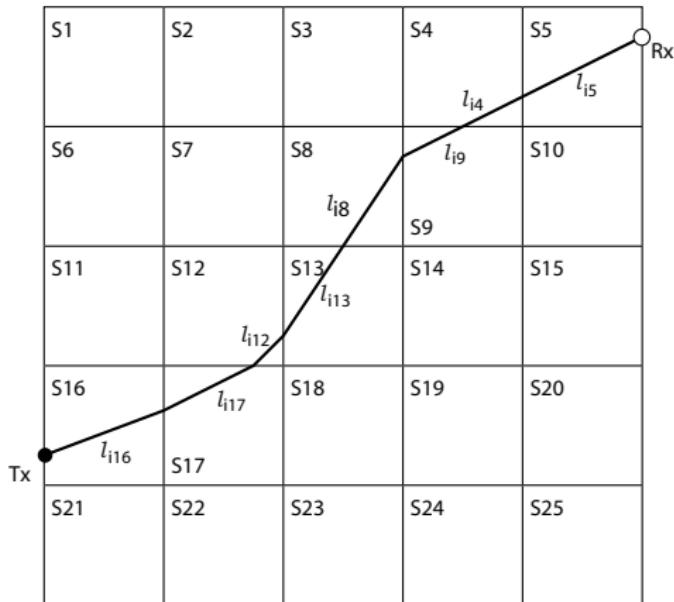
Mise en œuvre

Applications

Tomographie en onde  
complète

Références

- Pour faire les calculs, le domaine d'intérêt doit être discrétisé 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 bouts à bouts ;
- 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 rai

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

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

- Sous forme matricielle

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

# Solution – moindres carrés

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

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 rai

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  $C_s$

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

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 :

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

# Solution – Géostatistique

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en onde  
complète

Références

- Connaisant  $C_{ts}$ , 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 krigeage 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

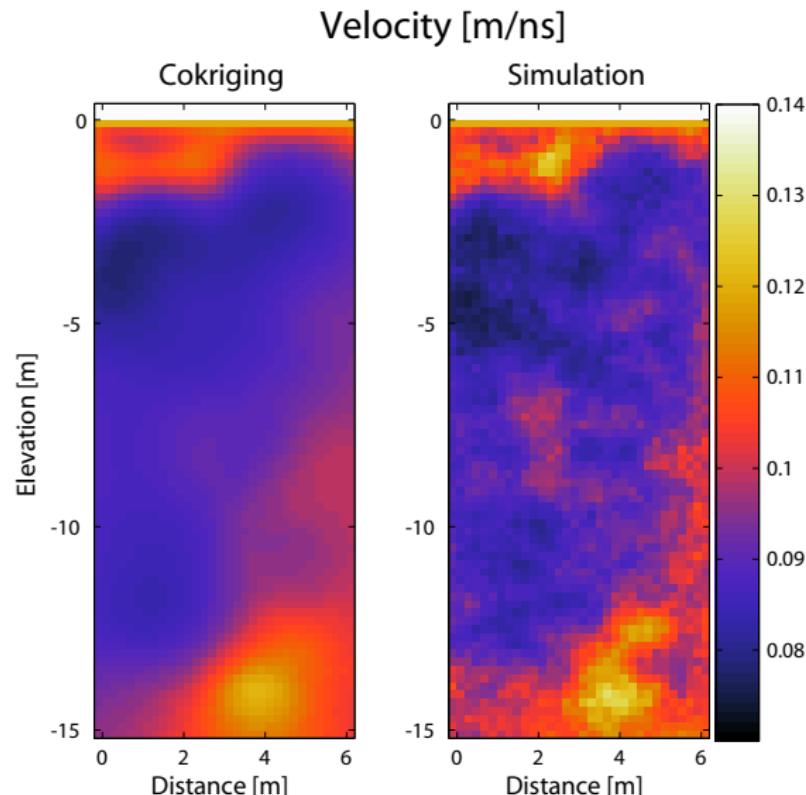
Théorie

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 rai

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

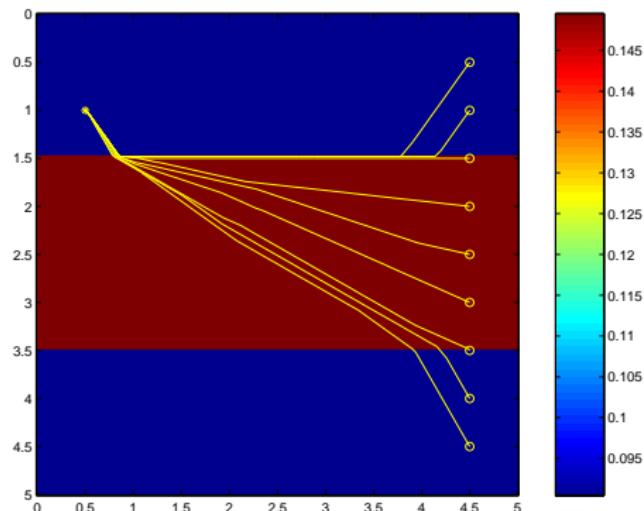
Mise en œuvre

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

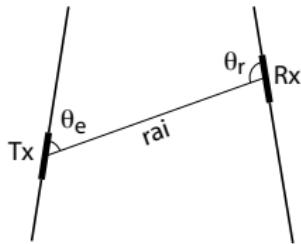
Mise en œuvre

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 rai

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 rai

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, piézoélectrique.*



source à impact

# Couverture et résolution

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

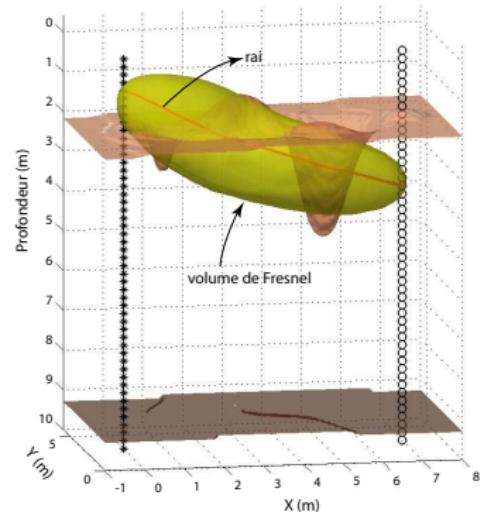
Tomographie en onde  
complète

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

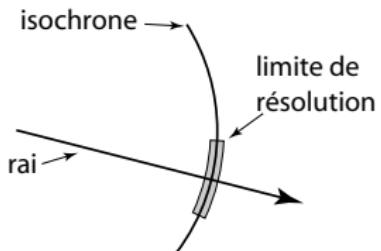
Mise en œuvre

Applications

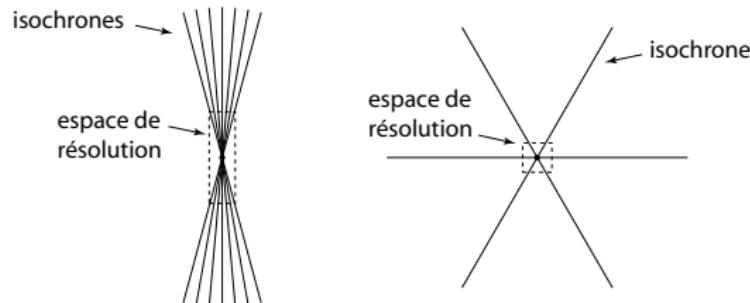
Tomographie en onde  
complète

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 rai

Théorie

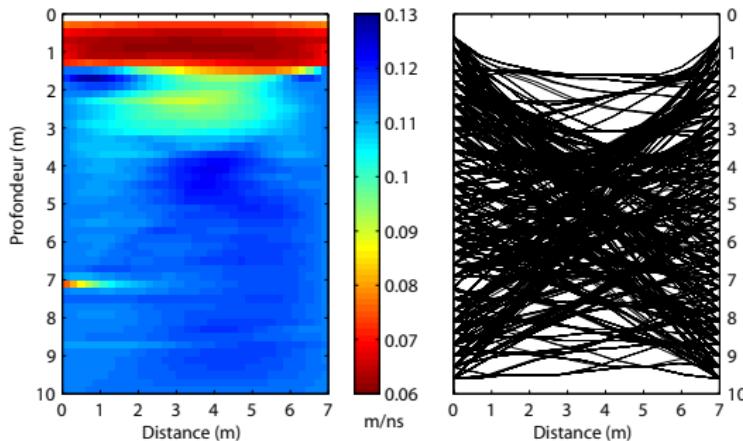
Mise en œuvre

Applications

Tomographie en onde  
complète

Références

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



# Couverture et résolution

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en onde  
complète

Références

- Cas extrême : si seulement des rais 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.

# Traitement des données

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

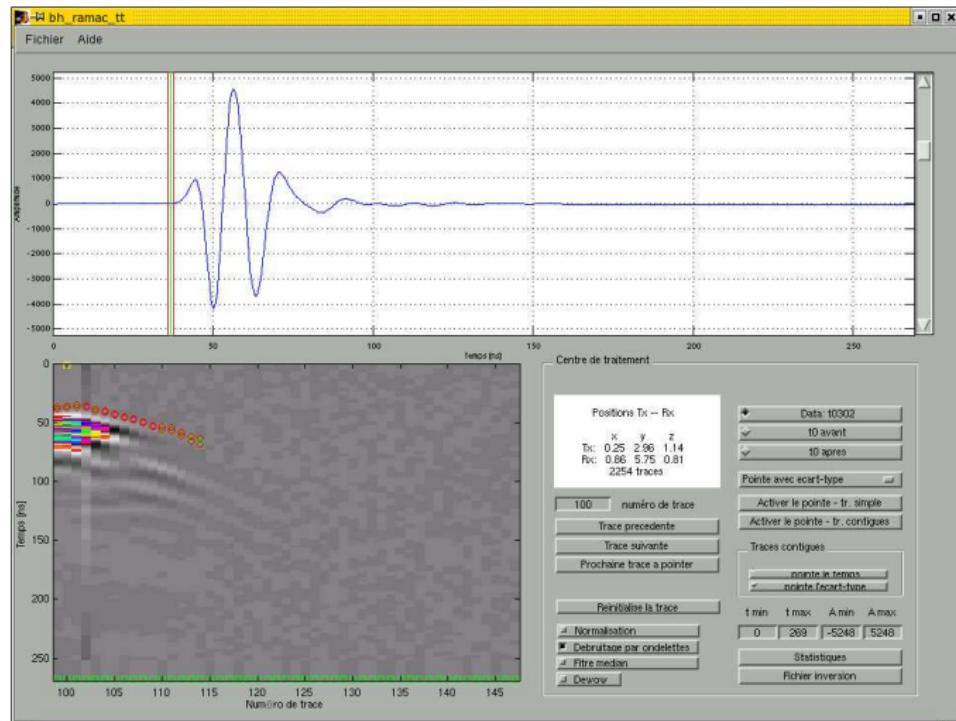
Théorie

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

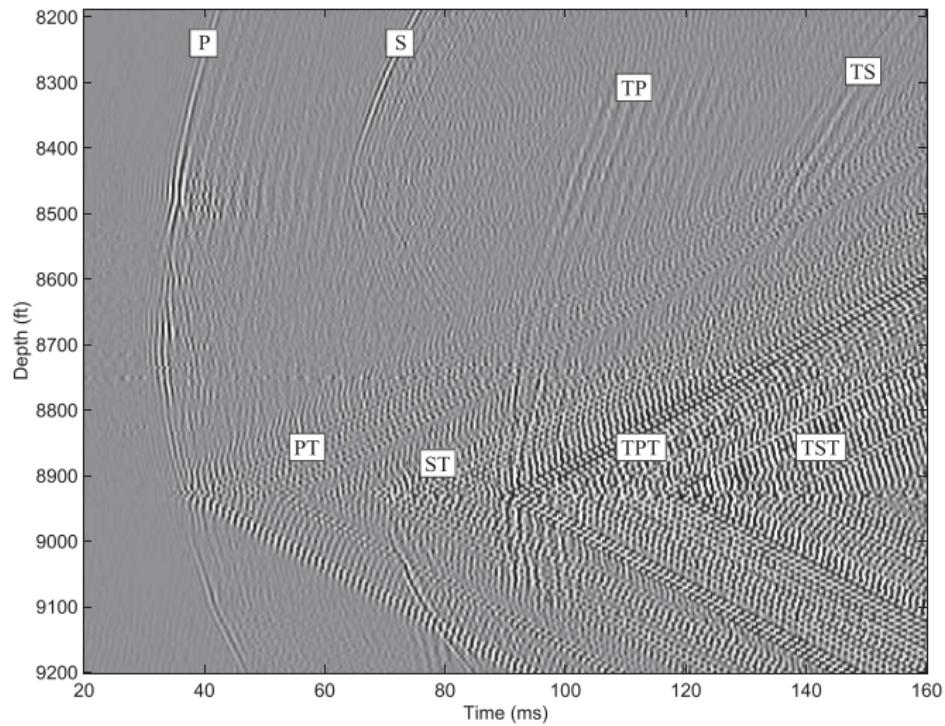
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en onde  
complète

Références



# Ondes de tube

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

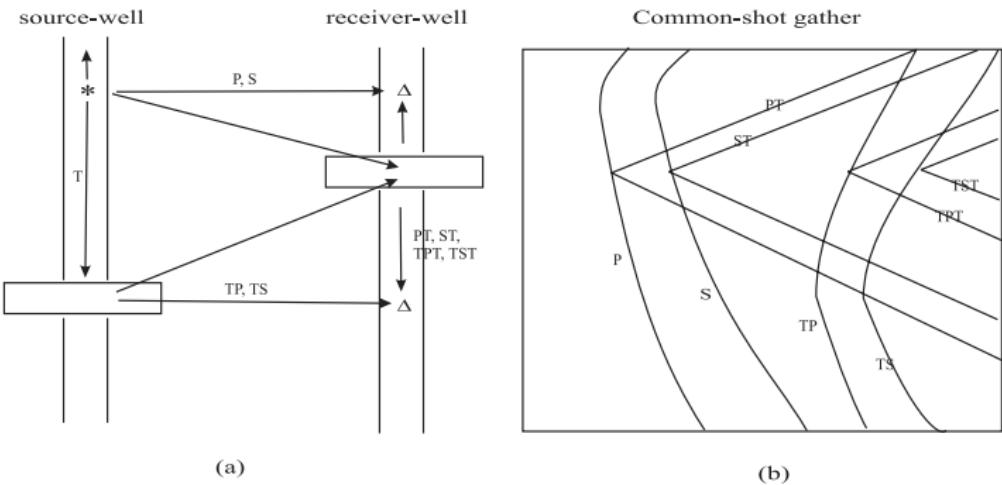
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en onde  
complète

Références



Principes

Tomographie par  
tracé de rai

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 factures sont des chemins d'écoulement où transitent des contaminanat provenant d'un dépotoir ;
- Les zones facturées sont associées à des vitesses sismiques faibles et des atténuations élevées ;

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

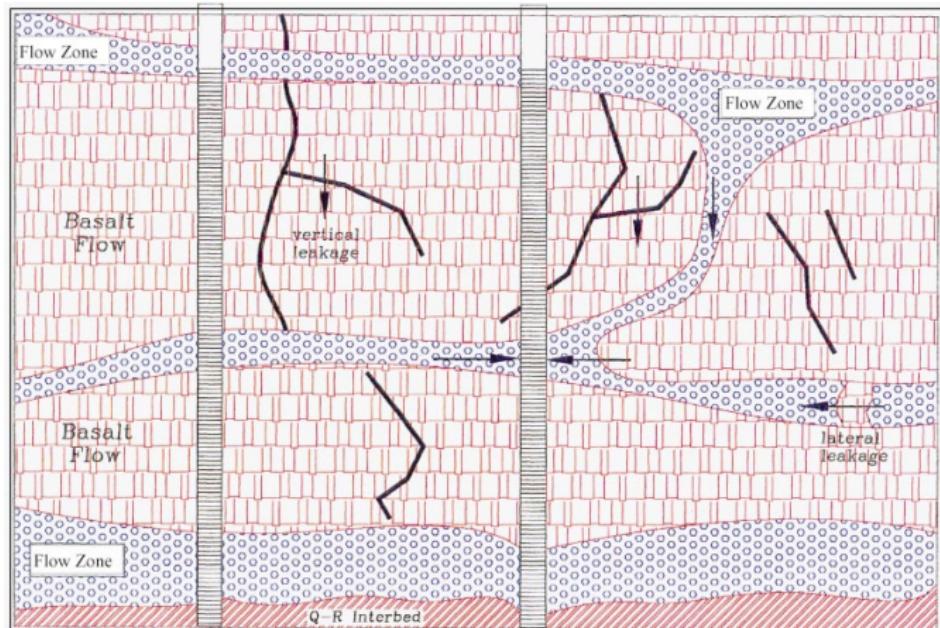
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en onde  
complète

Références



# Environnement

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

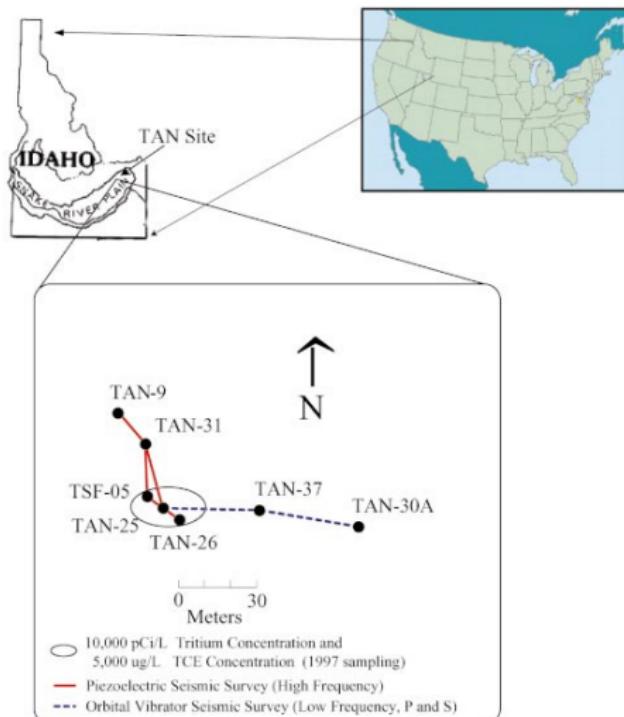
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en onde  
complète

Références



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 rai

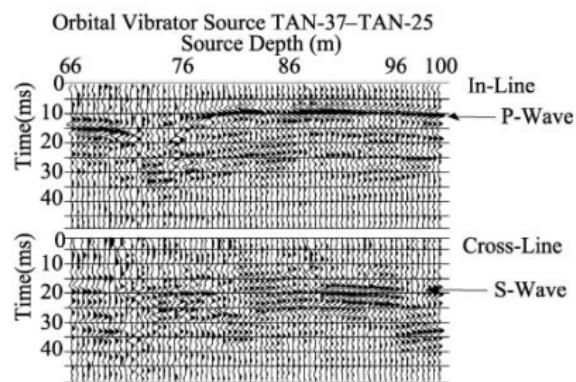
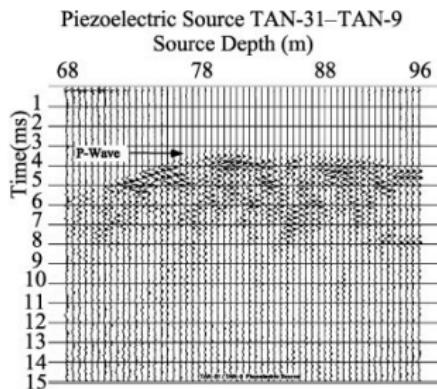
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en onde  
complète

Références



# Environnement

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

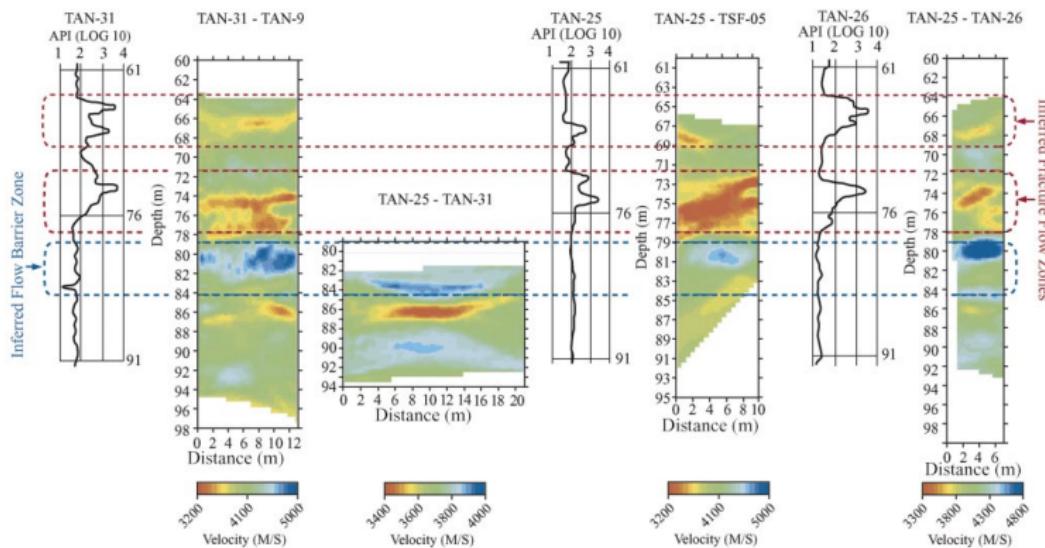
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en onde  
complète

Références



## Principes

Tomographie par  
tracé de rai

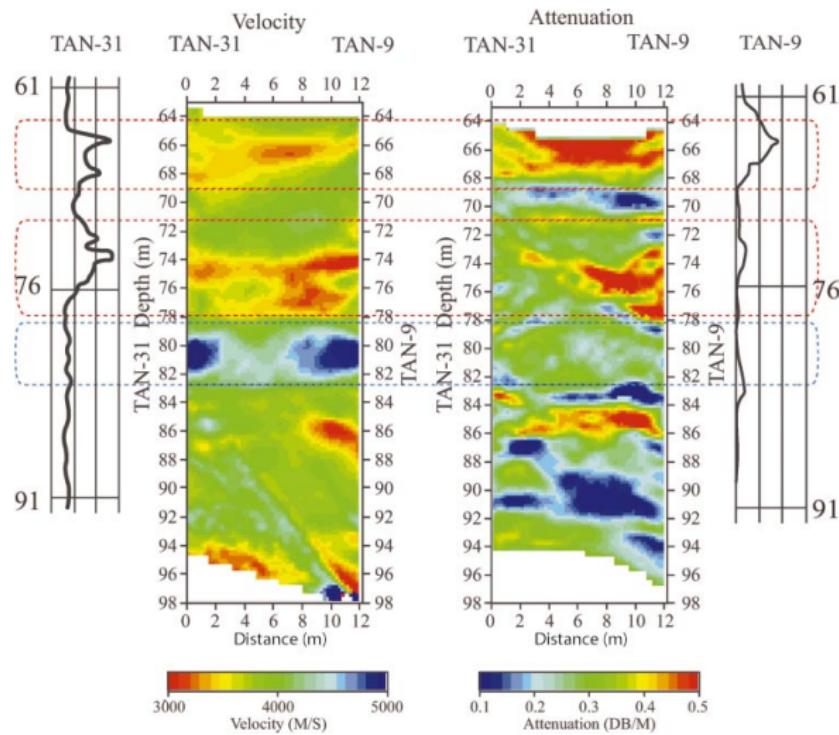
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en onde  
complète

Références



Principes

Tomographie par  
tracé de rai

**Tomographie en onde  
complète**

Théorie

Applications

Références

# Tomographie en onde complète

# Principes

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

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 rai

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 rai

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

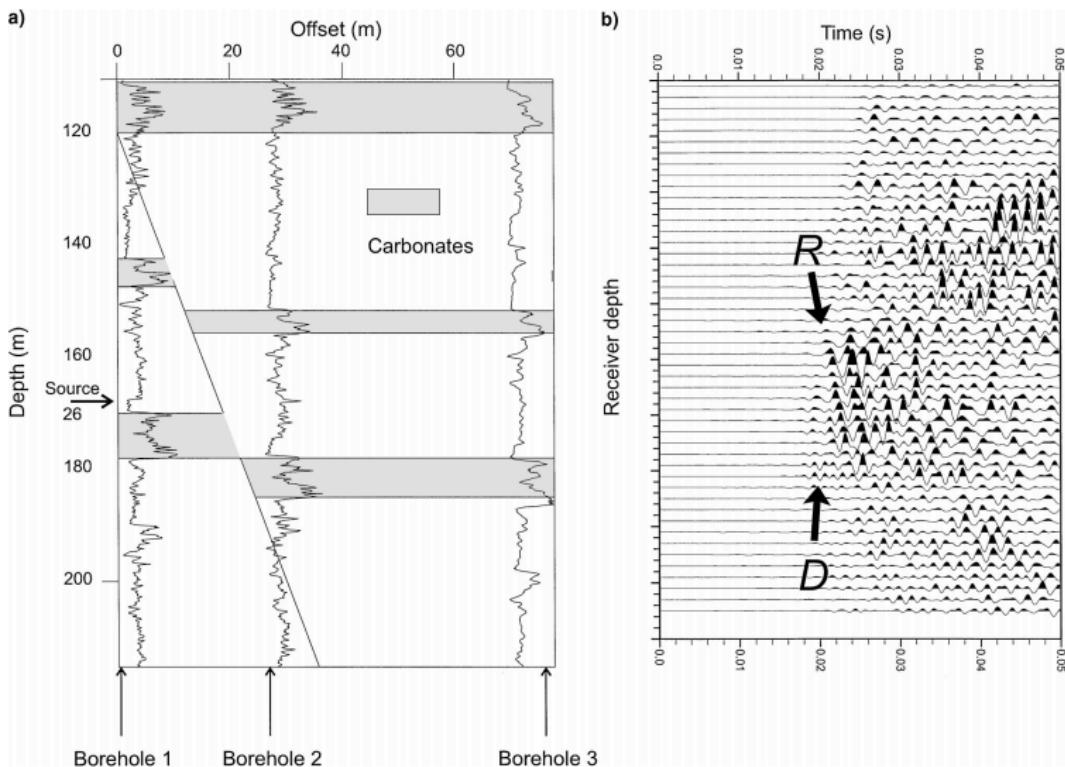
Tomographie par  
tracé de rai

Tomographie en onde  
complète

Théorie

Applications

Références



# Délinéation d'une faille

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

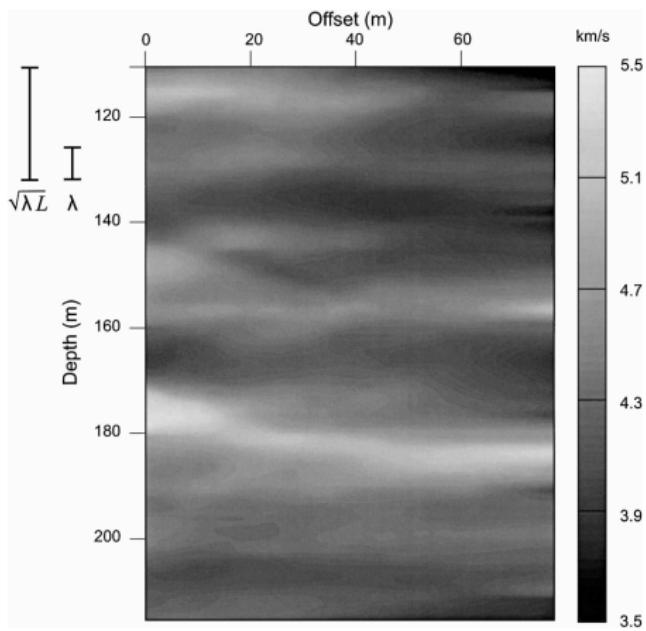
Tomographie en onde  
complète

Théorie

Applications

Références

- Tomogramme de vitesse obtenu par tracé de rais



# Délinéation d'une faille

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

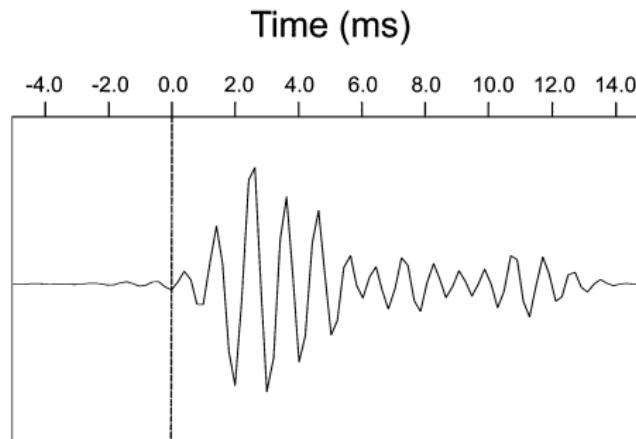
Tomographie en onde  
complète

Théorie

Applications

Références

- Signature de la source obtenue par déconvolution.



# Délinéation d'une faille

Principes

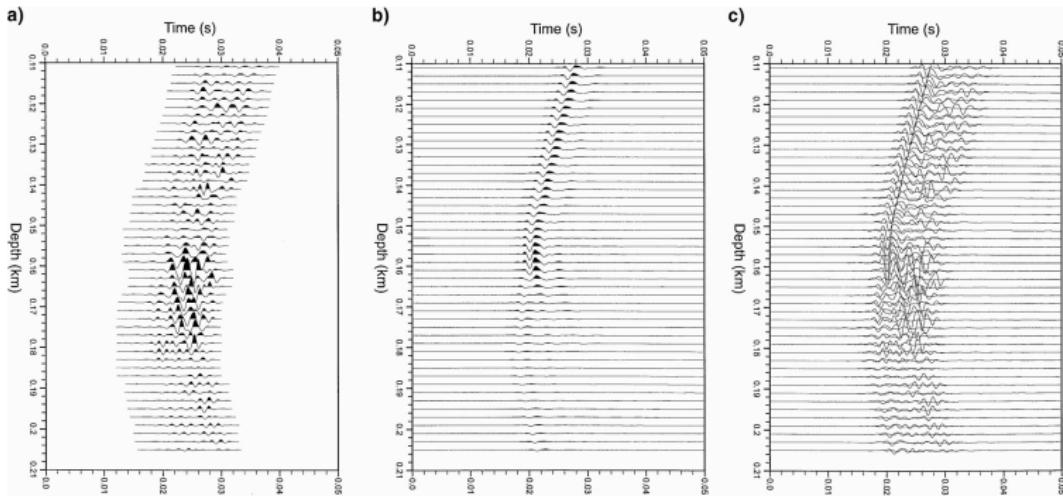
Tomographie par  
tracé de rai

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 rai

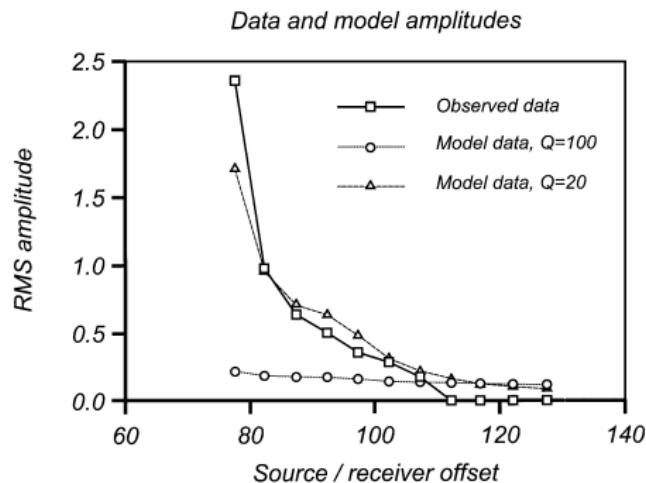
Tomographie en onde  
complète

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

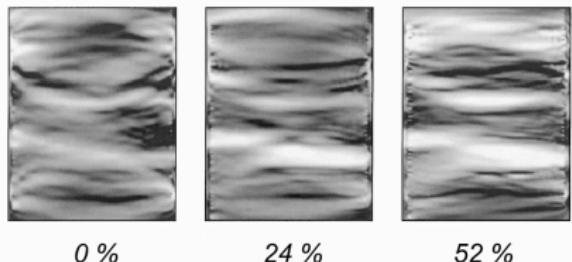
Applications

Références

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

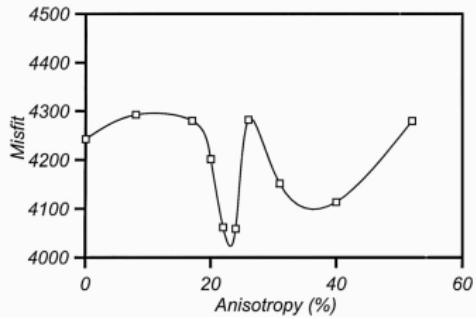
a)

*Images vs Anisotropy factor*



b)

*Anisotropy factor  
vs Misfit*



# Délinéation d'une faille

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

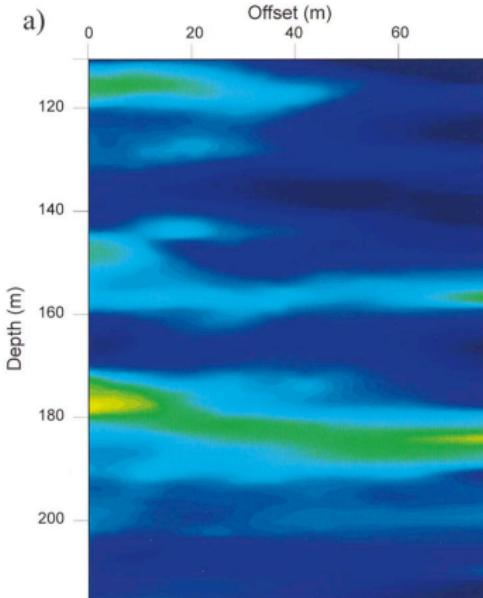
Tomographie en onde  
complète

Théorie

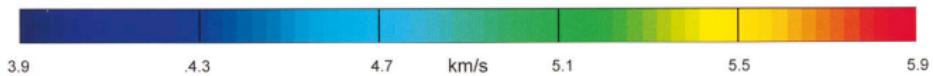
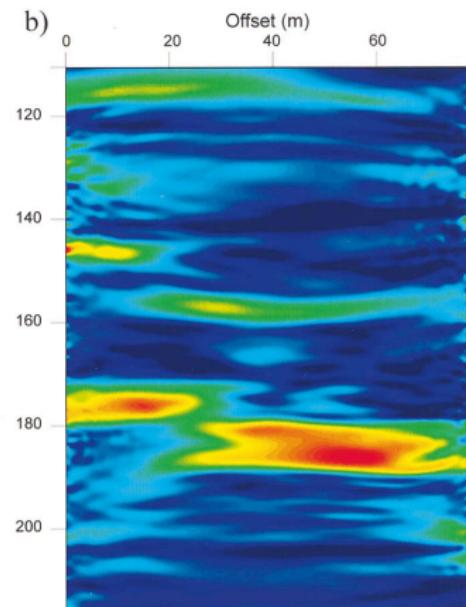
Applications

Références

Tracé de rais



Viscoacoustique



# Délinéation d'une faille

Principes

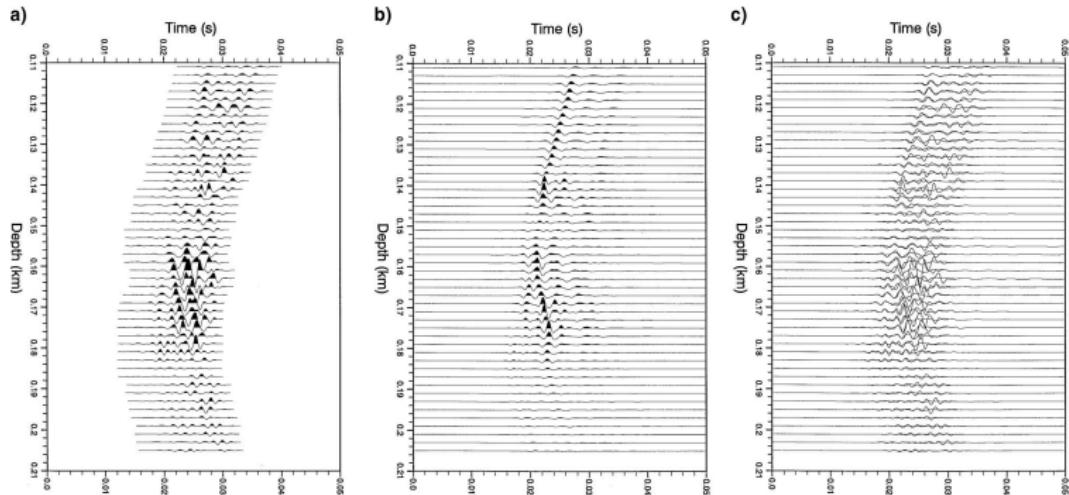
Tomographie par  
tracé de rai

Tomographie en onde  
complète

Théorie

Applications

Références



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

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

Tomographie en onde  
complète

Références

## Références

# Références

Principes

Tomographie par  
tracé de rai

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 rai

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.