

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 rai

Tomographie en
onde complète

Références

Principes

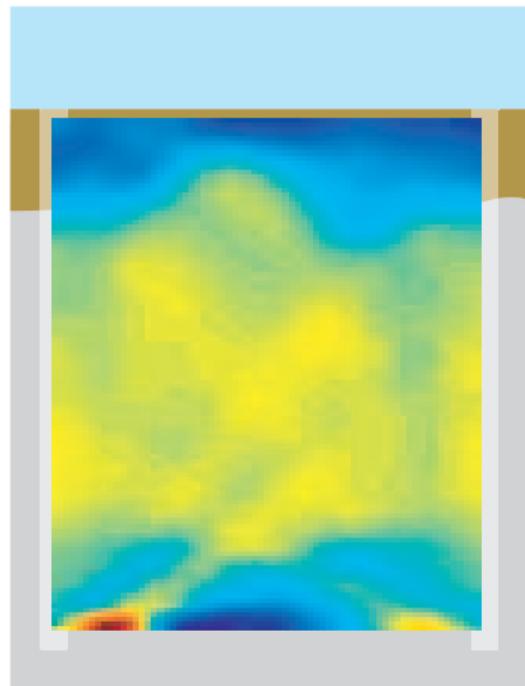
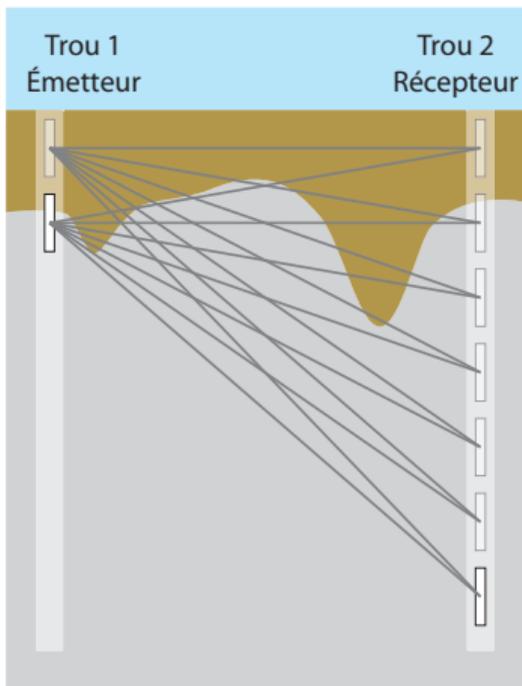
Principes

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;



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.

Principes

Tomographie par
tracé de rai

Tomographie en
onde complète

Références

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

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

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 .



Principes

Tomographie par
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

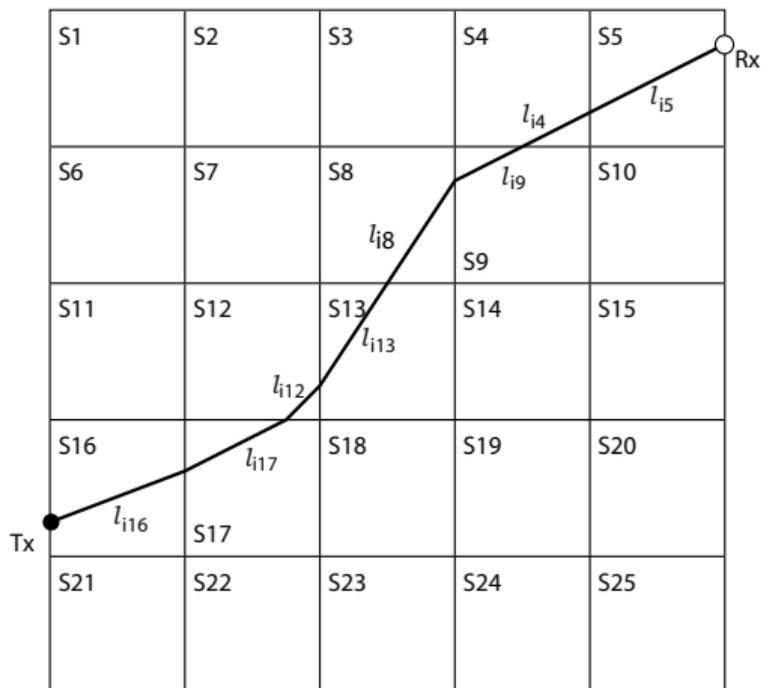
Applications

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.

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



- 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 ;

- 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 :

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1n_p} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2n_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n_o1} & l_{n_o2} & \cdots & l_{n_on_p} \end{bmatrix} \quad (4)$$

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 ».

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

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

- Sous forme matricielle

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

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 λ 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.

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).

Principes

Tomographie par
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en
onde complète

Références

- Le pondérateur lagrangien λ doit être déterminé par essai/erreur (méthodes automatiques peu robustes ou très coûteuses en calcul);
- On peut s'affranchir de λ 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 :

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

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 krigeage 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 .

Principes

Tomographie par
tracé de rai

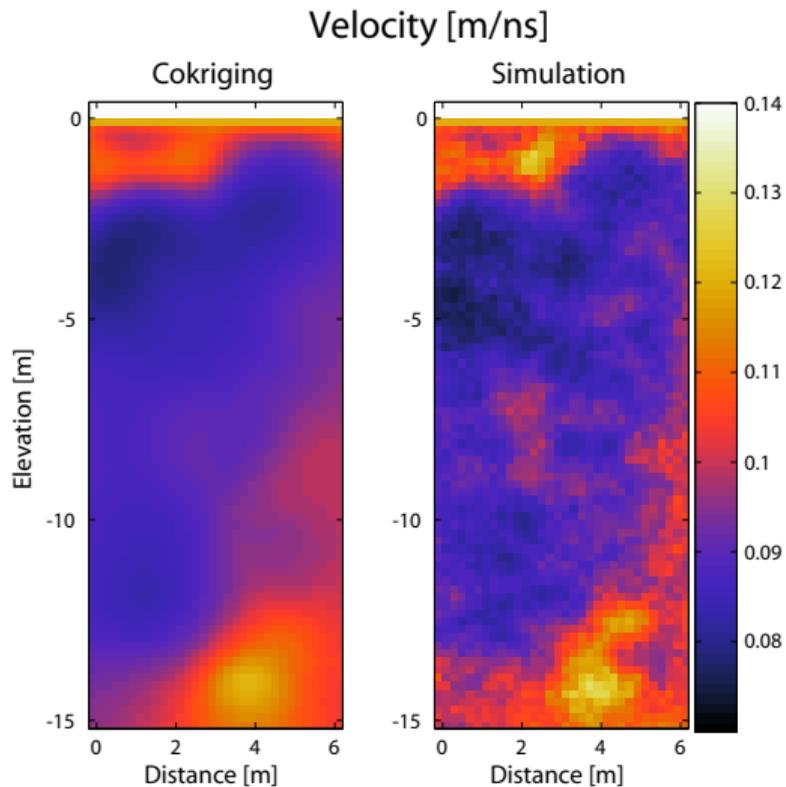
Théorie

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

- 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*.

Principes

Tomographie par
tracé de rai

Théorie

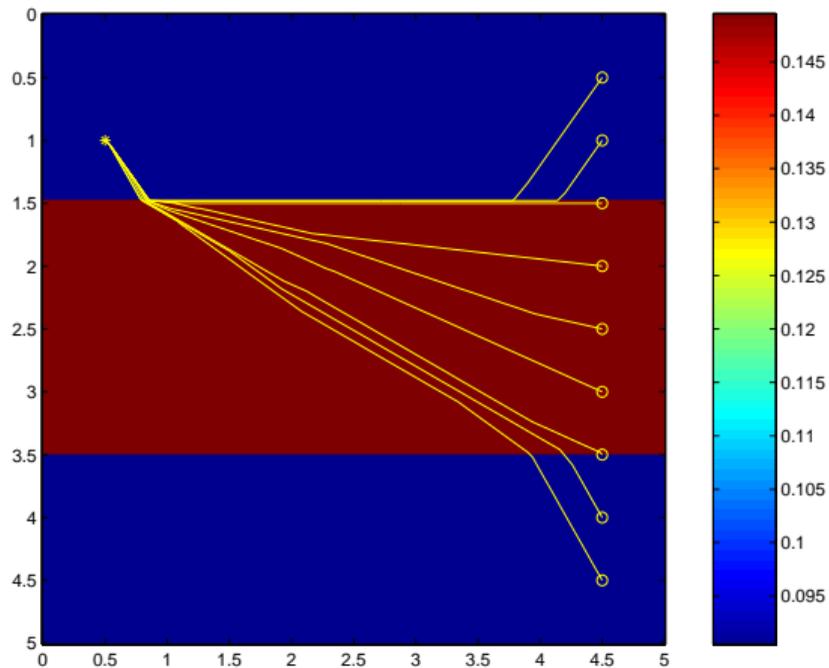
Mise en œuvre

Applications

Tomographie en
onde complète

Références

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



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 α ;
- 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 α de l'équation (16).

Principes

Tomographie par
tracé de rai

Théorie

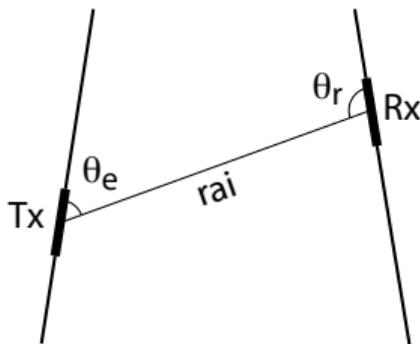
Mise en œuvre

Applications

Tomographie en
onde complète

Références

- Difficultés : A_0 , Γ_e et Γ_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, Γ_e et Γ_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

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

- 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 α 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)).

Principes

Tomographie par
tracé de rai

Théorie

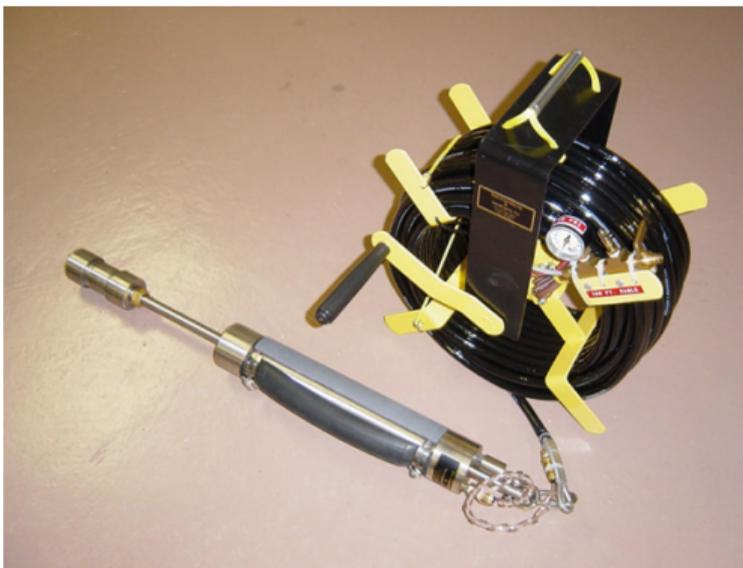
Mise en œuvre

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

Principes

Tomographie par
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en
onde complète

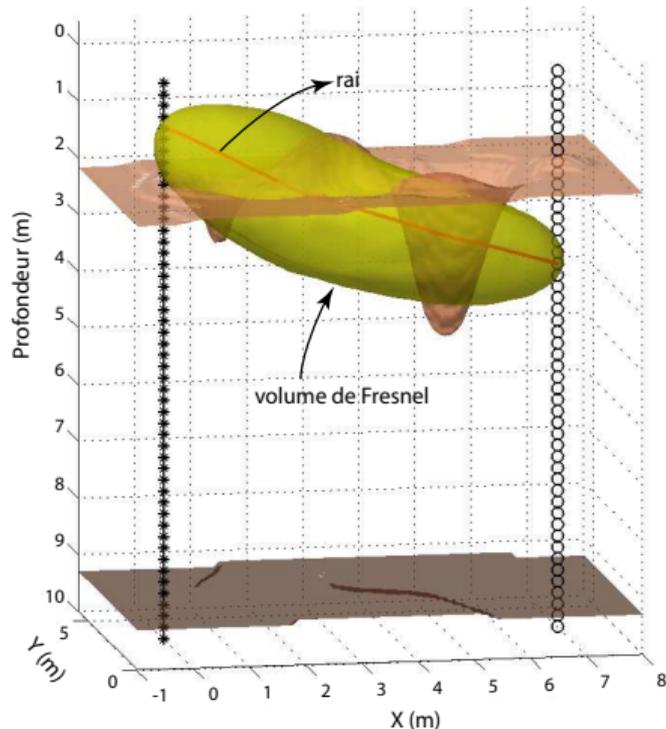
Références

- 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.



Principes

Tomographie par
tracé de rai

Théorie

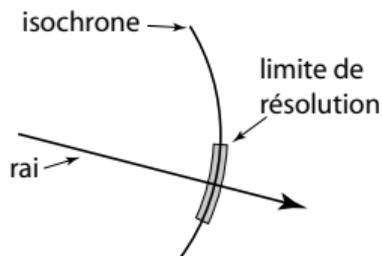
Mise en œuvre

Applications

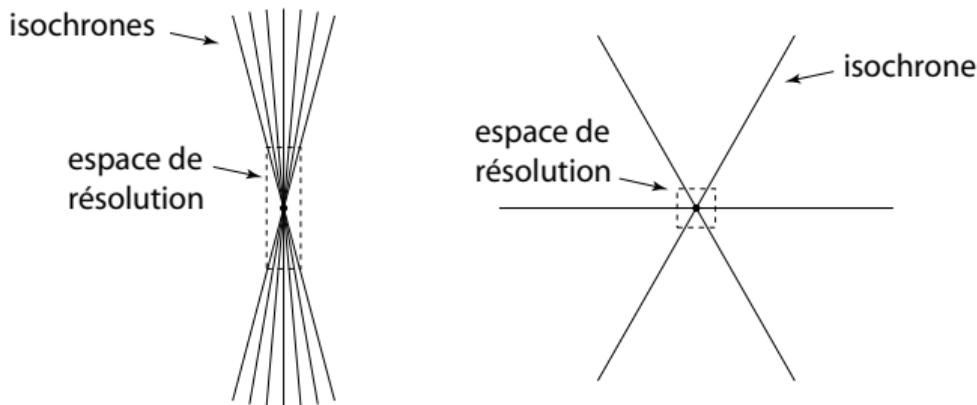
Tomographie en
onde complète

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



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 λ est la longueur de l'onde transmise.

Principes

Tomographie par

tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

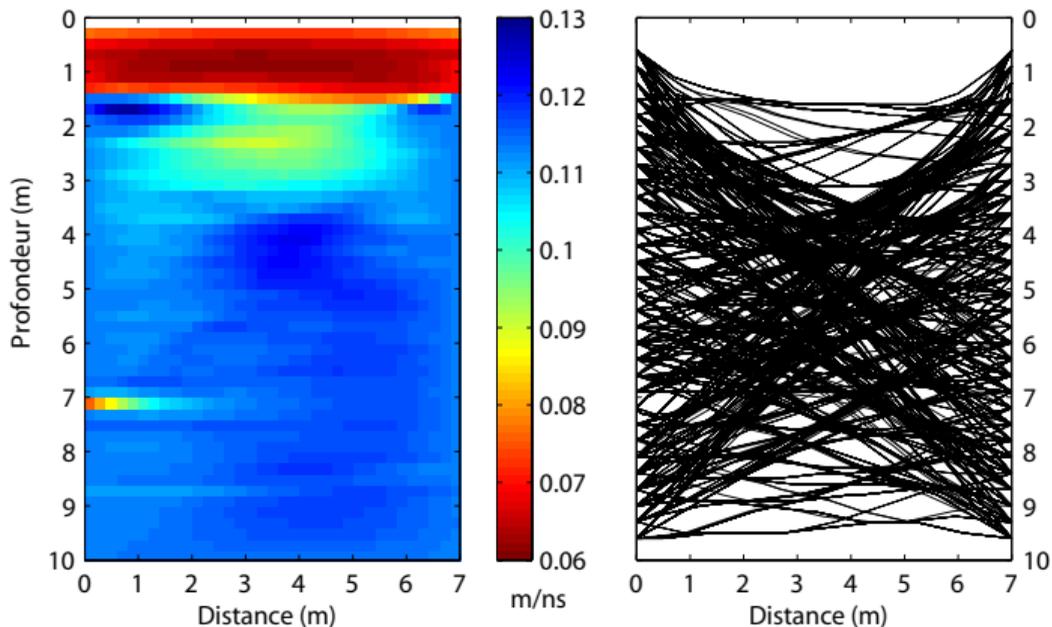
Applications

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)



Principes

Tomographie par
tracé de rai

Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en
onde complète

Références

- Cas extrême : si seulement des rai*s* 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.

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.

Principes

Tomographie par
tracé de rai

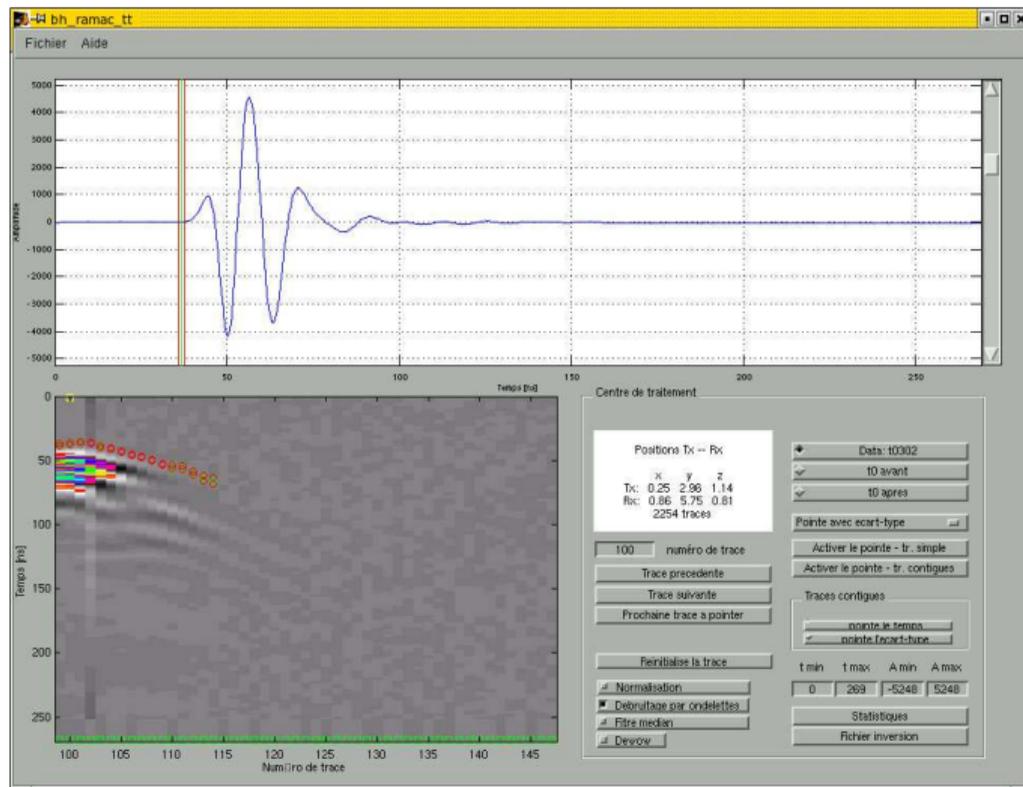
Théorie

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

- 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.

Principes

Tomographie par
tracé de rai

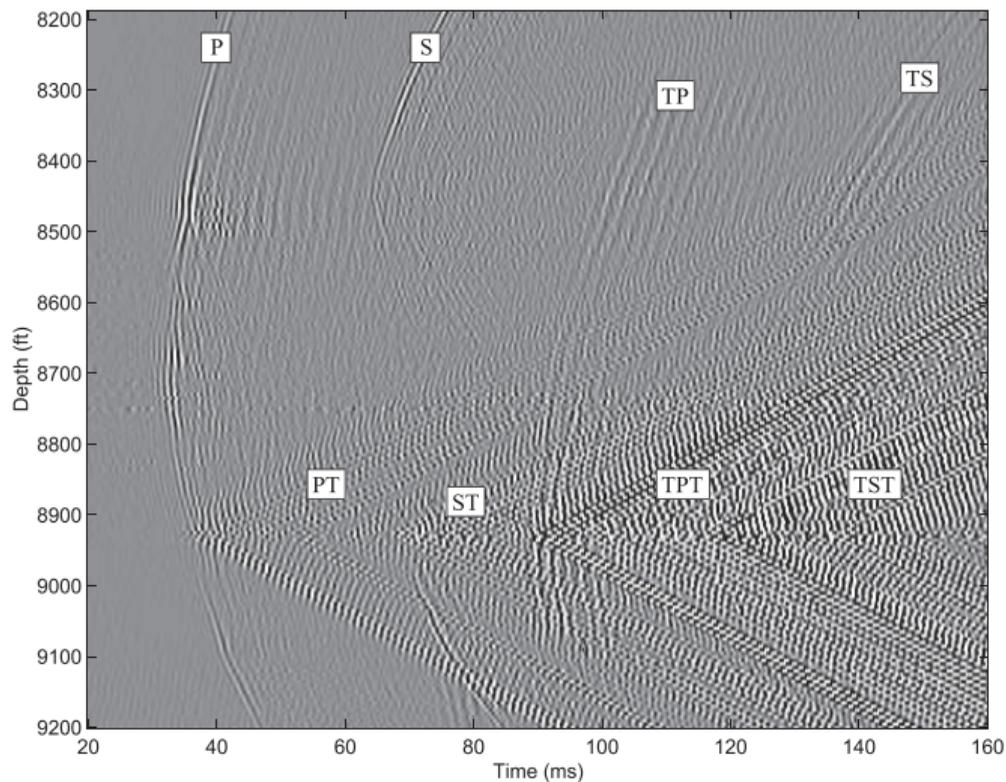
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en
onde complète

Références



Principes

Tomographie par
tracé de rai

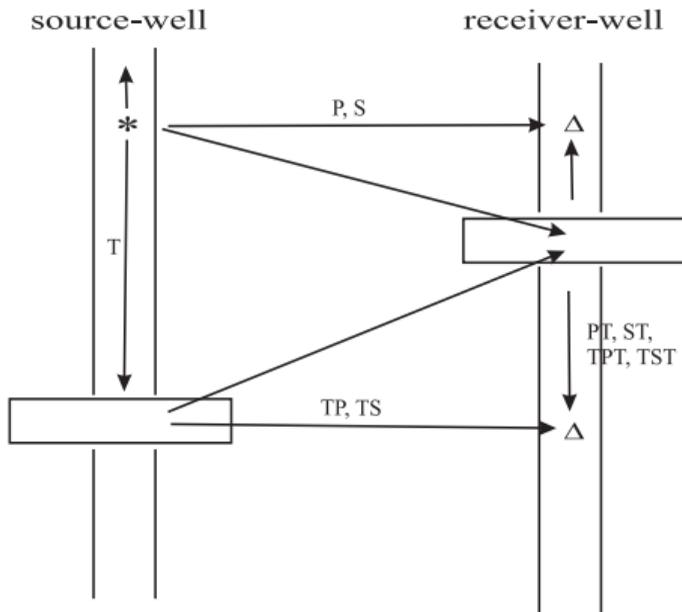
Théorie

Mise en œuvre

Applications

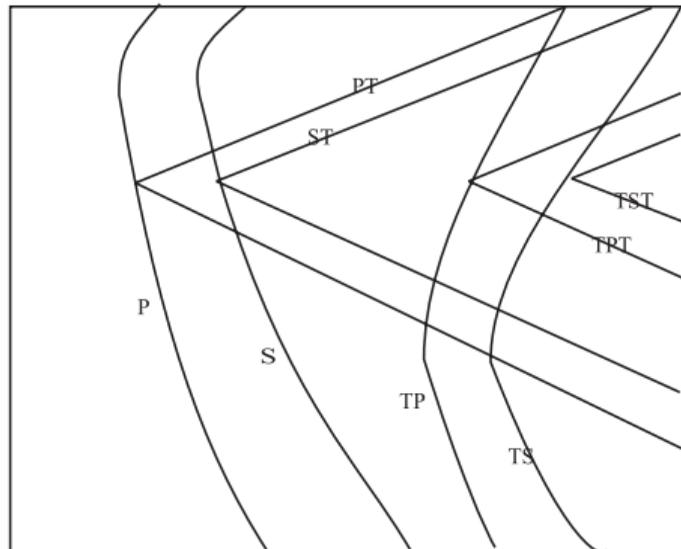
Tomographie en
onde complète

Références



(a)

Common-shot gather



(b)

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 fractures sont des chemins d'écoulement où transitent des contaminant provenant d'un dépotoir ;
- Les zones fracturées sont associées à des vitesses sismiques faibles et des atténuations élevées ;

Principes

Tomographie par
tracé de rai

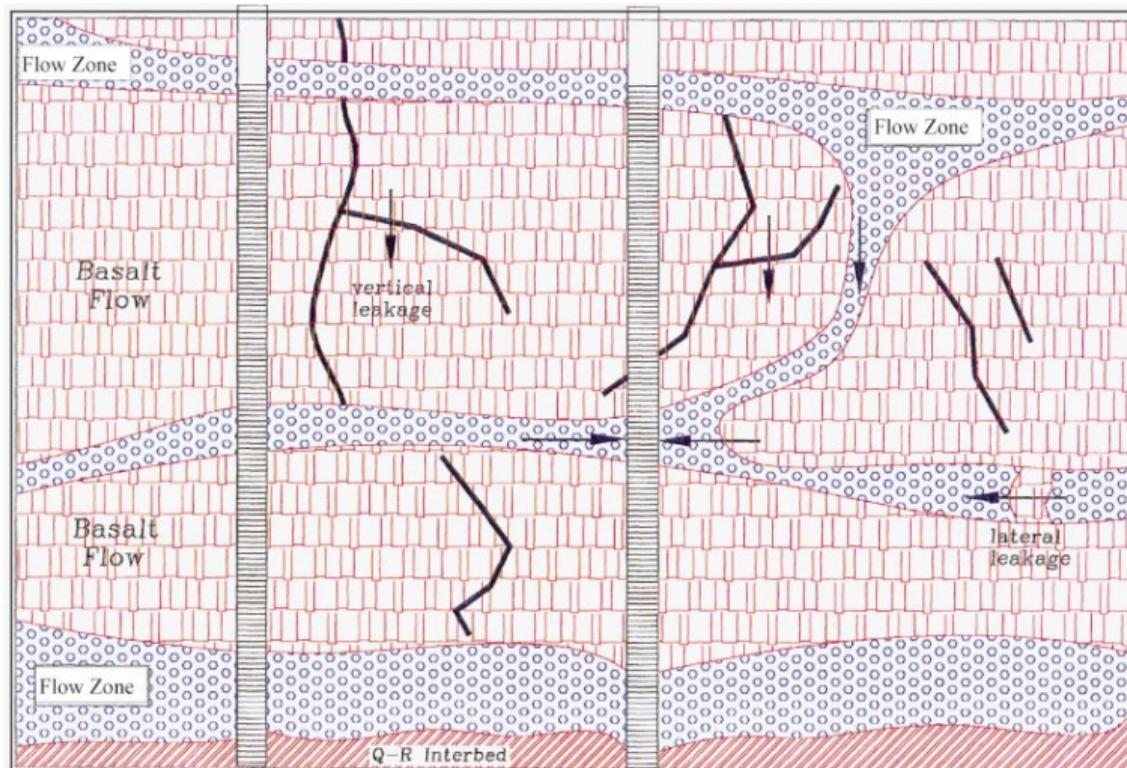
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en
onde complète

Références



Principes

Tomographie par
tracé de rai

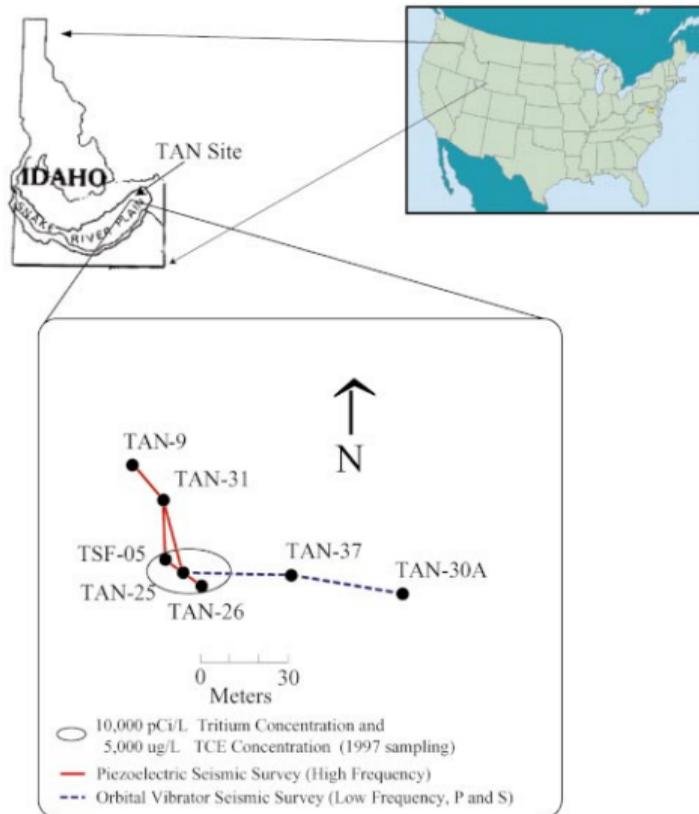
Théorie

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 sommés par position de tir pour rehausser S/B
- Vibreur 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

Principes

Tomographie par
tracé de rai

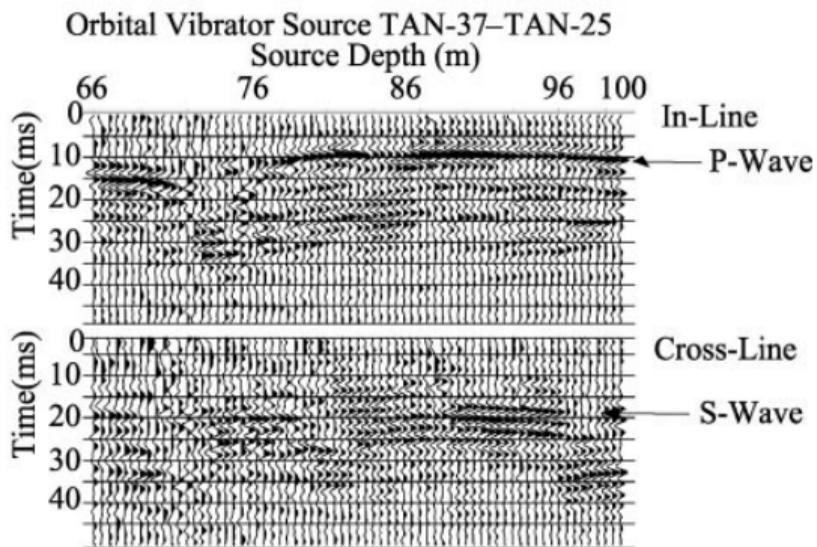
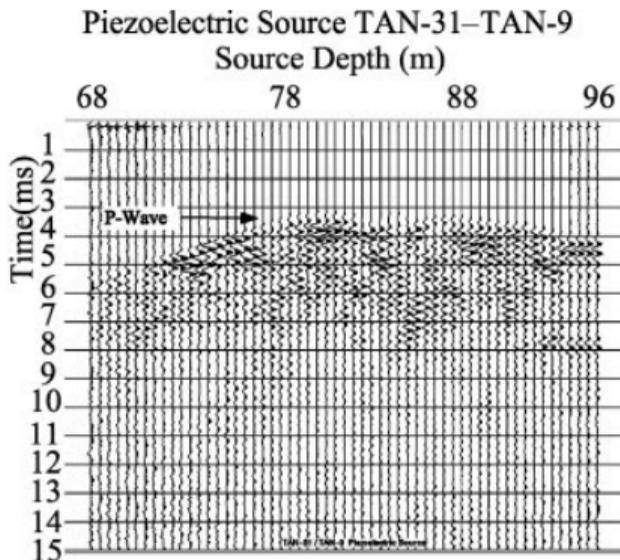
Théorie

Mise en œuvre

Applications

Tomographie en
onde complète

Références



Principes

Tomographie par

tracé de rai

Théorie

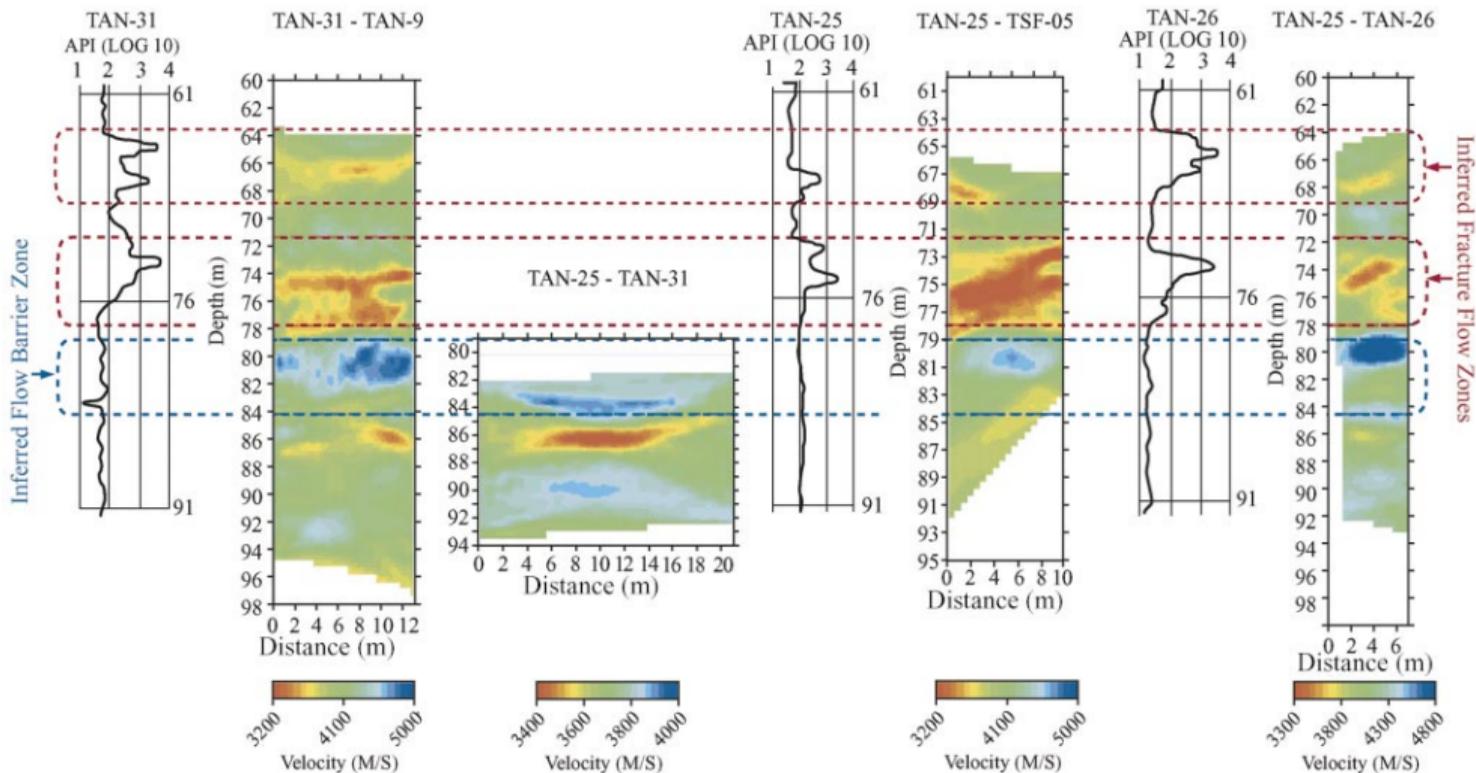
Mise en œuvre

Applications

Tomographie en

onde complète

Références



Principes

Tomographie par
tracé de rai

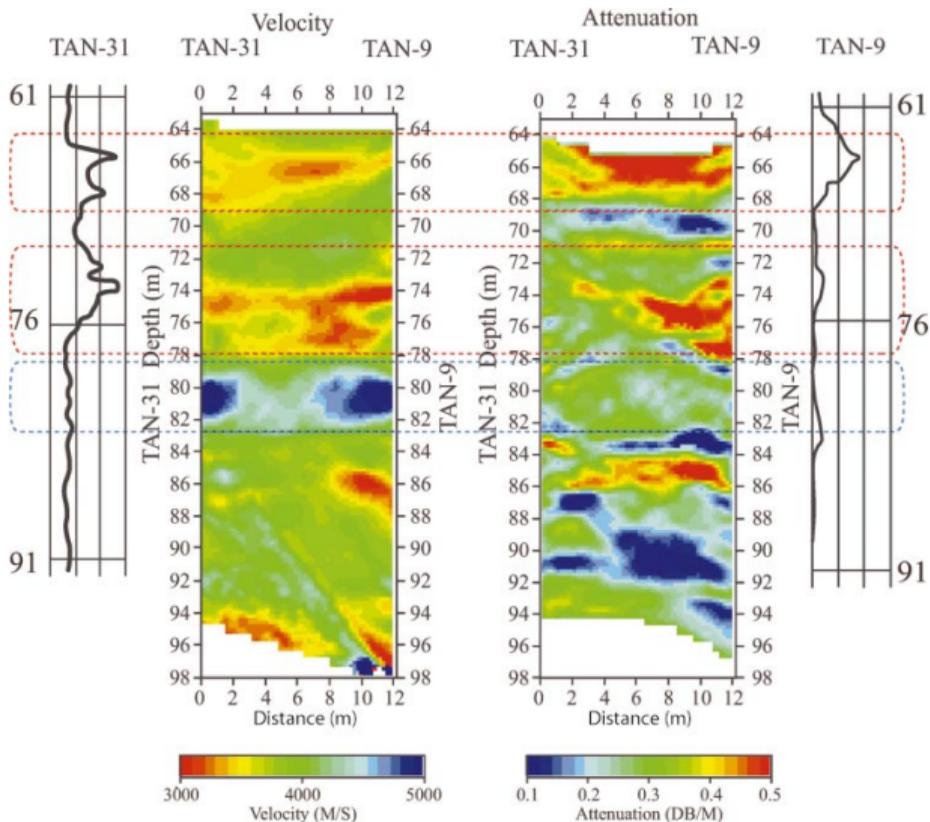
Théorie

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

- 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 ($v_c = v_r + i v_i$);
 - Facteur de qualité sismique $Q = \text{Re}(v_c^2) / \text{Im}(v_c^2)$.

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 ω ;
 - Formalisme adapté au problème inverse.

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.

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

- 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 α permet de pondérer un terme par rapport à l'autre.

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

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.

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

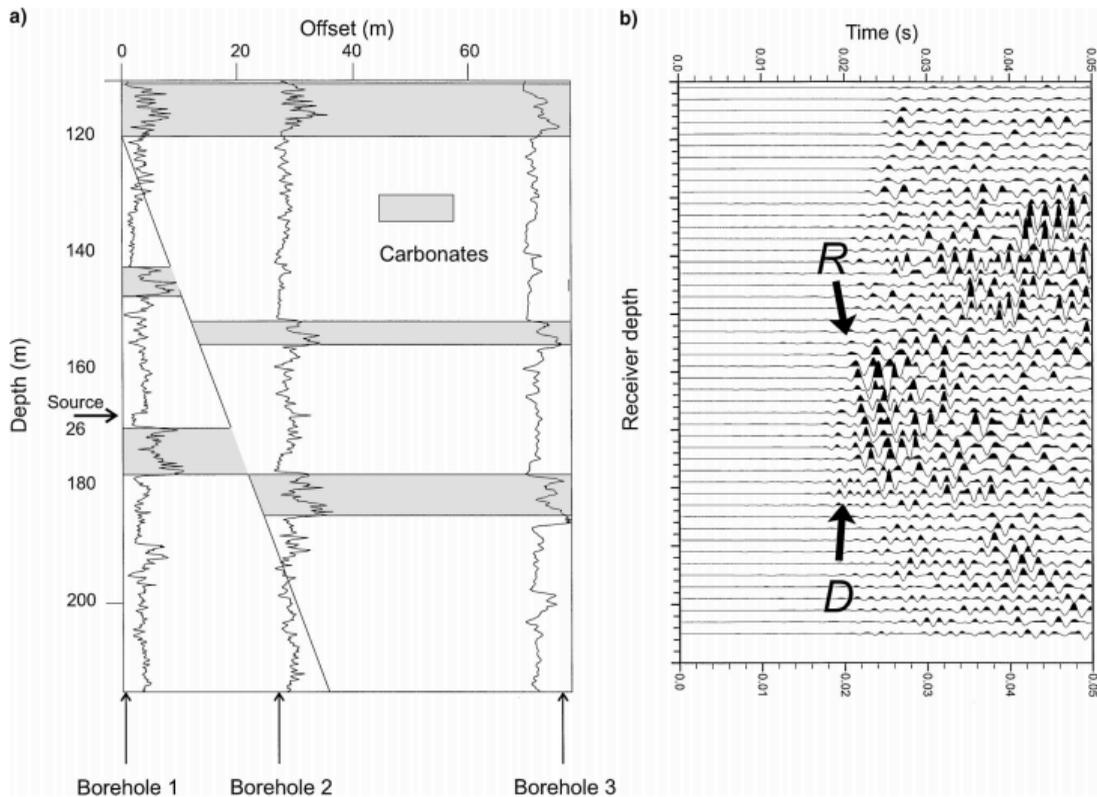
Tomographie par
tracé de rai

Tomographie en
onde complète

Théorie

Applications

Références



Principes

Tomographie par
tracé de rai

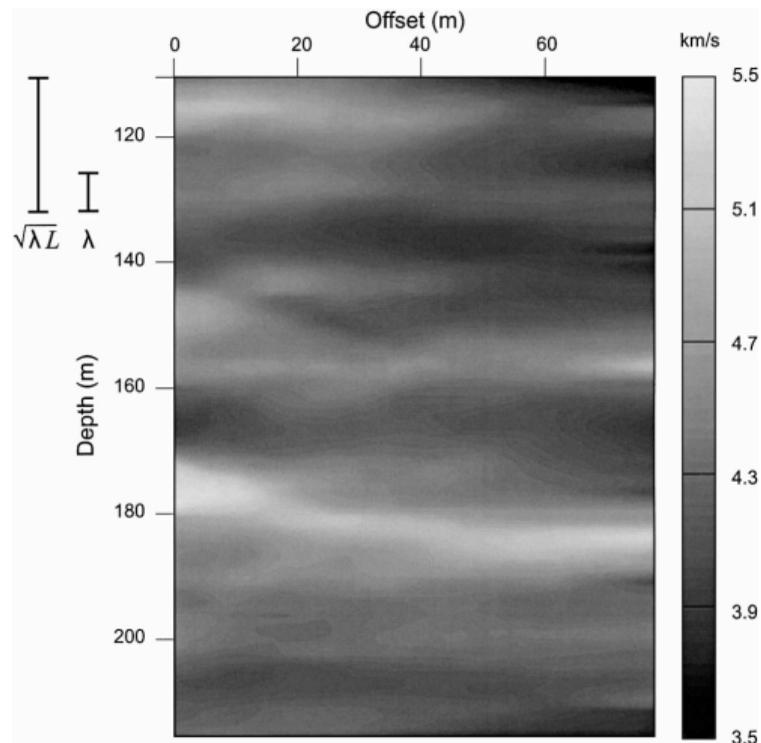
Tomographie en
onde complète

Théorie

Applications

Références

- Tomogramme de vitesse obtenu par tracé de rais



Principes

Tomographie par
tracé de rai

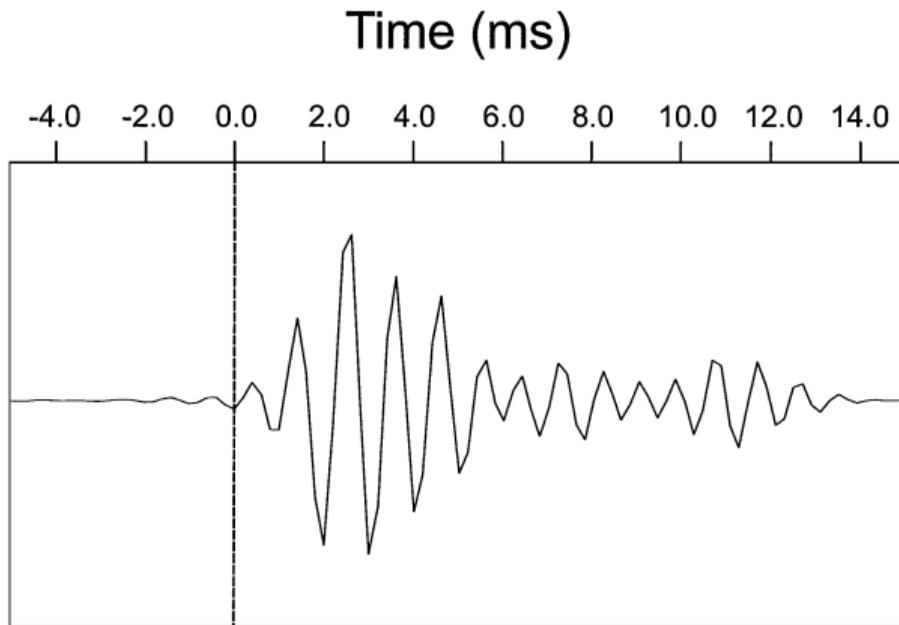
Tomographie en
onde complète

Théorie

Applications

Références

- Signature de la source obtenue par déconvolution.



Délinéation d'une faille

Principes

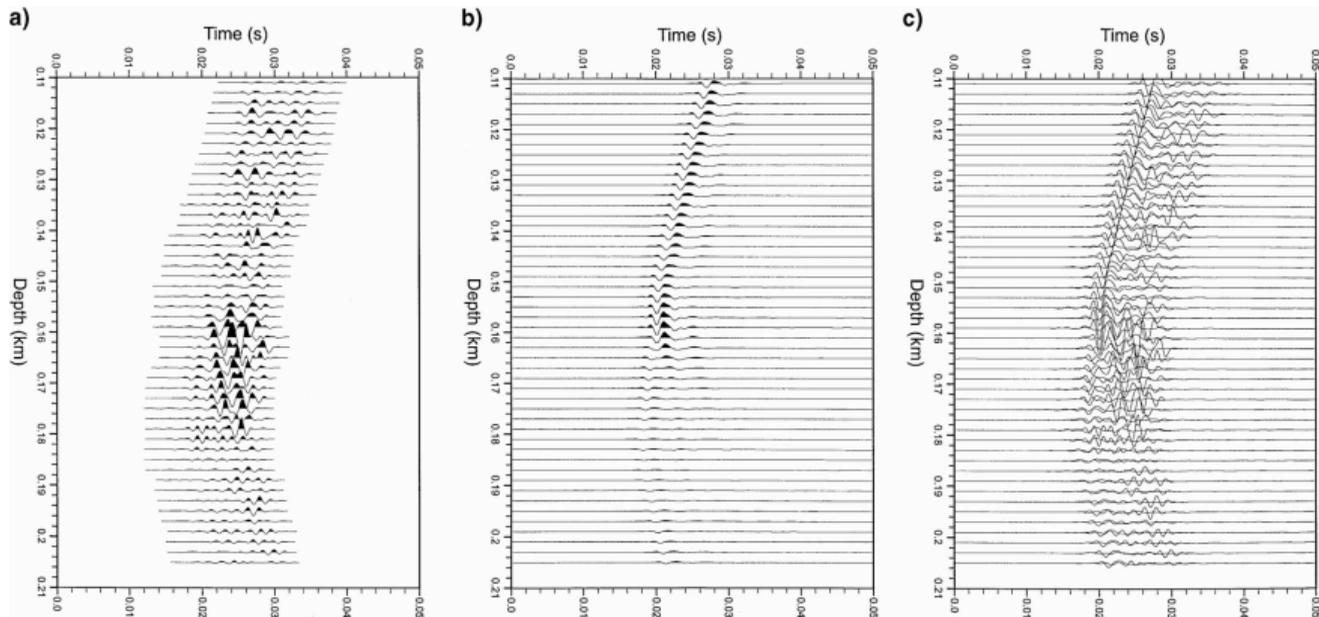
Tomographie par
tracé de rai

Tomographie en
onde complète

Théorie

Applications

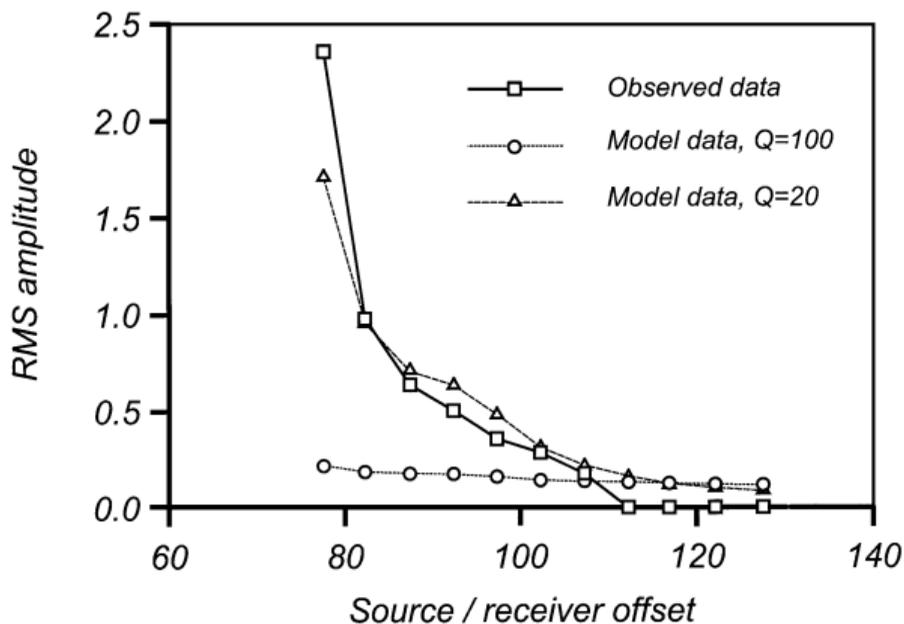
Références



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

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

Data and model amplitudes



Principes

Tomographie par
tracé de rai

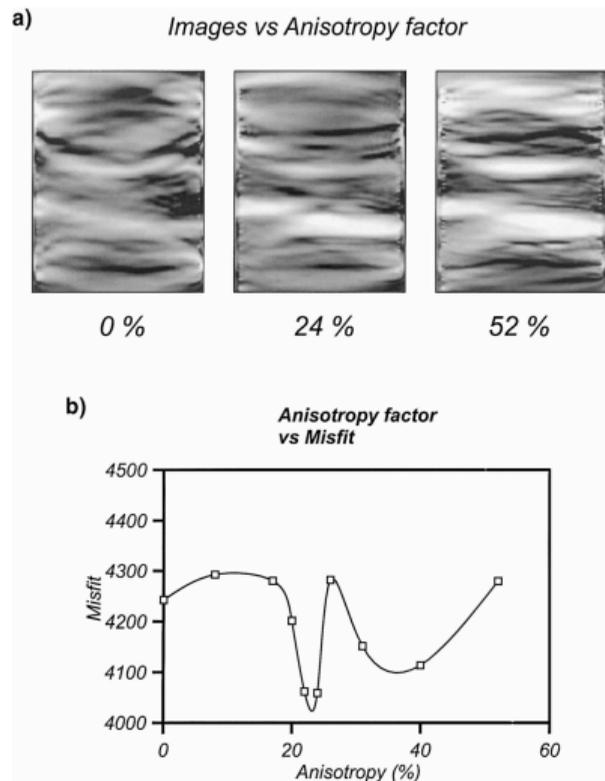
Tomographie en
onde complète

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 rai

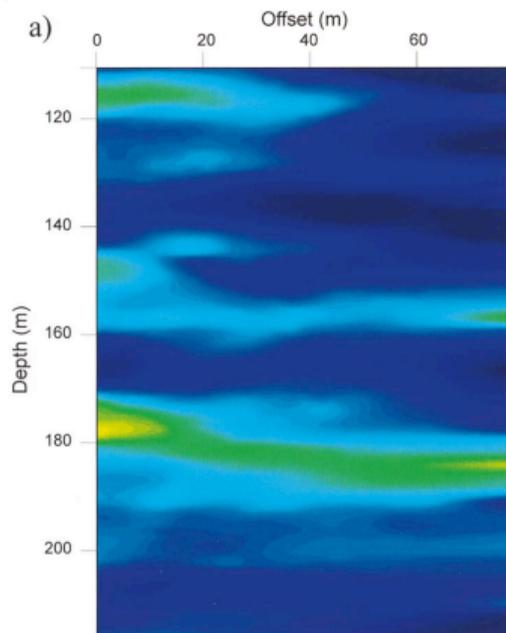
Tomographie en
onde complète

Théorie

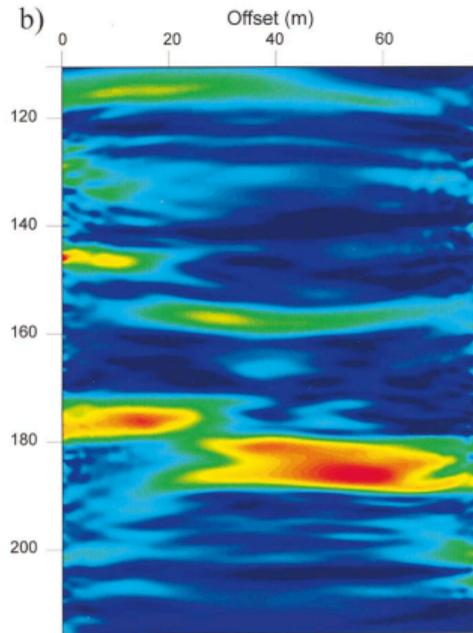
Applications

Références

Tracé de rai



Viscoacoustique



Délinéation d'une faille

Principes

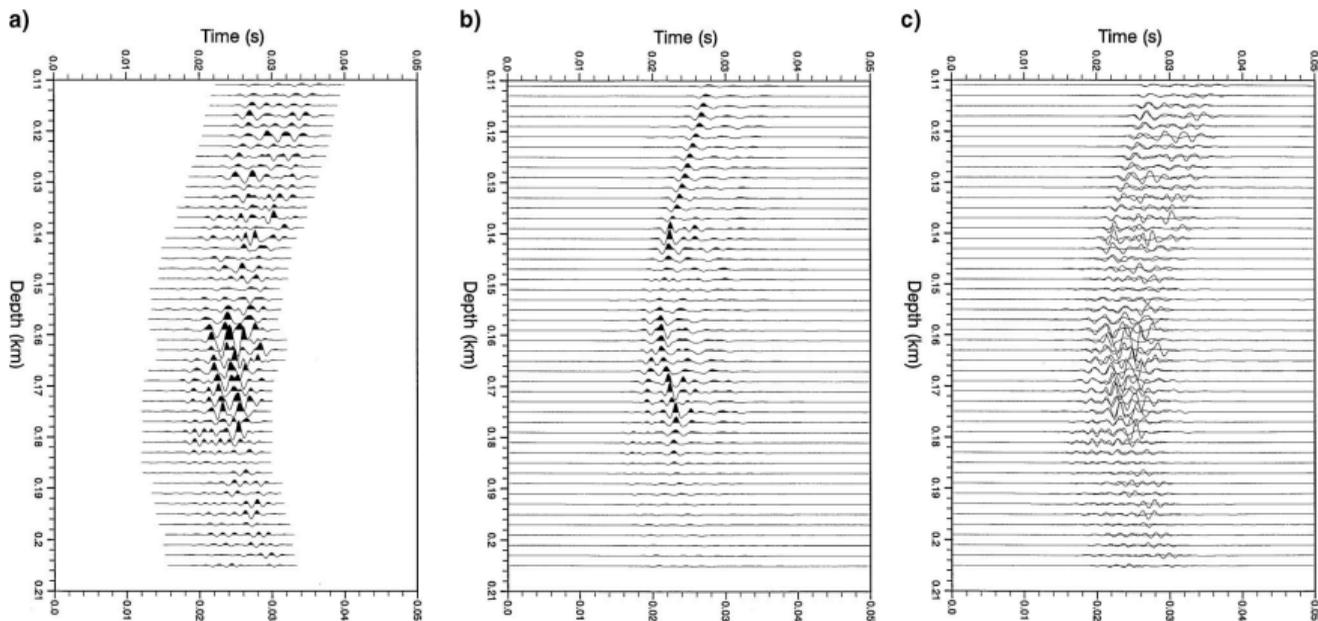
Tomographie par
tracé de rai

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

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;

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.