

GEO1303 – Méthodes sismiques 10 - Anisotropie

Bernard Giroux
(bernard.giroux@ete.inrs.ca)

Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Version 1.0.8
Automne 2019

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

Introduction

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- L'anisotropie est définie comme la propriété d'être dépendant de la direction;
- Si un milieu élastique est anisotrope, les ondes sismiques se propageant dans différentes directions le feront à des vitesses différentes;
- Dans les roches sédimentaires, les causes possibles d'anisotropie sont :
 - une anisotropie intrinsèque causée par une orientation préférentielle des grains ou par la forme des minéraux. Les shales sont un bon exemple;
 - une succession de lits isotropes de faible épaisseur par rapport à la longueur d'onde sismique (Backus, 1962);
 - des fractures ou micro fissures orientées selon une direction préférentielle;
 - des contraintes non hydrostatiques.
- Ces facteurs peuvent se combiner.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

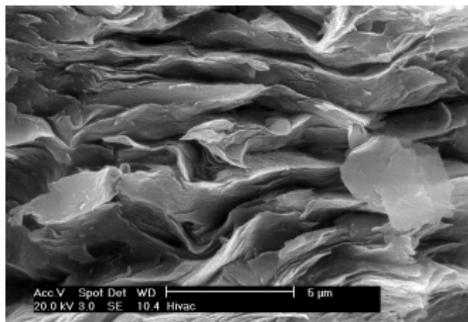
Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

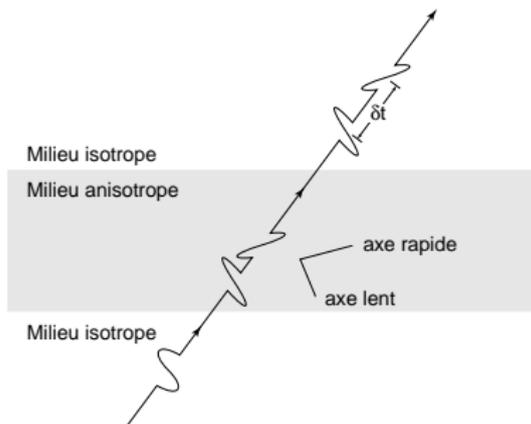
Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- L'anisotropie a longtemps été négligée dans le traitement des données sismiques en raison de la difficulté à la quantifier ;
- Le traitement de l'anisotropie est devenu inévitable en raison de
 - l'acquisition de données avec des dépôts longs ;
 - l'utilisation accrue des ondes S et de la biréfringence ;



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- L'effet de l'anisotropie sur les ondes P est moins drastique que sur les ondes S ;
- Cependant, lorsque présente, ignorer l'anisotropie pour les ondes P
 - provoque une distorsion dans l'imagerie des réflecteurs inclinés et la migration avant sommation;
 - entraîne une erreur sur la détermination de l'échelle de profondeur en raison de l'incompatibilité entre la vitesse verticale et la vitesse de sommation.
- Depuis le milieu des années 90, les outils de traitement ont été adaptés pour permettre un traitement adéquat.
- La suite de ce cours est très largement tirée de Tsvankin (2005).
- Un traitement théorique exhaustif de la propagation des ondes dans les milieux anisotropes est donné par Carcione (2007).

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de
groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase
et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

Théorie de base

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- L'équation d'onde pour les milieux anisotropes est

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = f_i, \quad (1)$$

avec

- $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ le déplacement;
- x_j les coordonnées cartésiennes;
- f_i la force appliquée;
- τ_{ij} le tenseur de contrainte;

et où on assume une sommation des indices $j = 1, 2, 3$.

- Contraintes et déformations e sont liées par la loi de Hooke, dont la forme générale est

$$\tau_{ij} = c_{ijkl} e_{kl}. \quad (2)$$

- Le tenseur de déformation est

$$e_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right). \quad (3)$$

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- En combinant (2) et (3) dans (1), et en assumant que le tenseur c_{ijkl} varie faiblement dans l'espace (dérivées négligeables), on obtient

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} = f_i. \quad (4)$$

- Notes :
 - Dans la littérature anglophone, c_{ijkl} est nommé *stiffness tensor*, traduit par tenseur des rigidités ;
 - La loi de Hooke peut aussi s'écrire $e_{ij} = s_{ijkl} \tau_{kl}$, où s_{ijkl} est nommé *compliance tensor*, traduit par tenseur des complaisances.

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Solution pour une onde plane ($\mathbf{f} = 0$) se propageant avec une vitesse de phase V :

$$u_k = U_k e^{i\omega(n_j x_j / V - t)} \quad (5)$$

- \mathbf{U} est le vecteur de polarisation;
 - \mathbf{n} est un vecteur normal au front d'onde (qui satisfait la condition $n_j x_j - Vt = \text{const}$), qui permet de définir le vecteur de lenteur $\mathbf{p} = \mathbf{n}/V$;
 - ω est la fréquence angulaire.
- Le vecteur de polarisation est donné par l'équation de Christoffel

$$\begin{bmatrix} G_{11} - \rho V^2 & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} - \rho V^2 & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} - \rho V^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = 0. \quad (6)$$

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Les éléments G_{ik} constituent la matrice de Christoffel et valent

$$G_{ik} = c_{ijkl}n_jn_l. \quad (7)$$

- L'équation de Christoffel décrit un système à 3 valeurs propres pour ρV^2 , soit

$$x^3 + ax^2 + bx + c = 0.$$

où $x = \rho V^2$ et

$$a = -(G_{11} + G_{22} + G_{33}),$$

$$b = G_{11}G_{22} + G_{11}G_{33} + G_{22}G_{33} - G_{12}^2 - G_{13}^2 - G_{23}^2,$$

$$c = G_{11}G_{23}^2 + G_{22}G_{13}^2 + G_{33}G_{12}^2 - G_{11}G_{22}G_{33} - 2G_{12}G_{13}G_{23}.$$

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- En posant $x = y - a/3$, on a le système

$$y^3 + dy + q = 0,$$

où

$$d = -\frac{a^2}{3} + b \quad \text{et} \quad q = 2\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{ab}{3} + c.$$

- Les racines sont

$$y_{1,2,3} = 2\sqrt{\frac{-d}{3}} \cos\left(\frac{\beta}{3} + k\frac{2\pi}{3}\right), \quad k = 0, 1, 2$$

avec

$$\cos \beta = -\frac{q}{2\sqrt{(-d/3)^3}}; \quad 0 \leq \beta \leq \pi$$

- La vitesse de phase est donnée par

$$\rho V^2 = y - \frac{a}{3} \tag{8}$$

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Pour une phase V donnée, l'équation (8) a donc trois racines, une rapide qui correspond à l'onde P et deux lentes (ondes S);
- Dans un milieu anisotrope, ces composantes ne sont pas nécessairement parallèles ou perpendiculaires à \mathbf{n} :
 - il n'y a pas d'onde purement longitudinale ou transversale;
 - on nomme le mode rapide « quasi- P » (ou qP), et les modes lents « quasi- S_1 » et « quasi- S_2 » (ou qS).
- Le tracé de $1/V$ pour toutes les directions de propagation est appelé *surface de lenteur*, et sa topologie est liée au front d'onde.

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

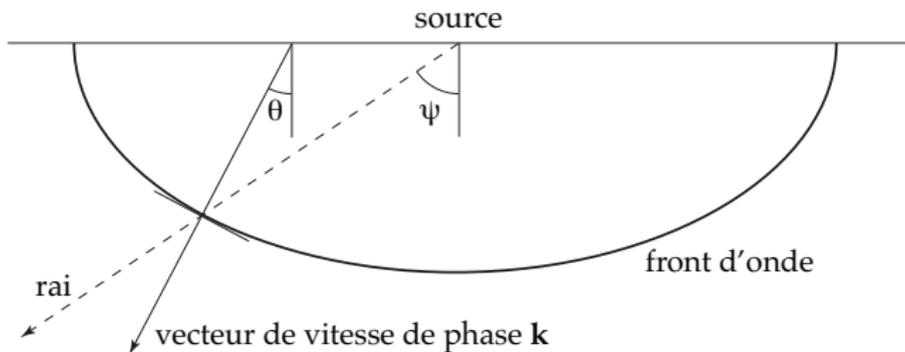
Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Le vecteur de la vitesse de groupe (\mathbf{V}_G) indique la direction et la vitesse à laquelle se propage l'énergie, et détermine ainsi le rai sismique ;



- \mathbf{V}_G est perpendiculaire à la surface de lenteur ;
- θ est l'angle du vecteur de lenteur \mathbf{p} par rapport à la verticale ;
- ψ est l'angle du rai sismique par rapport à la verticale.

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

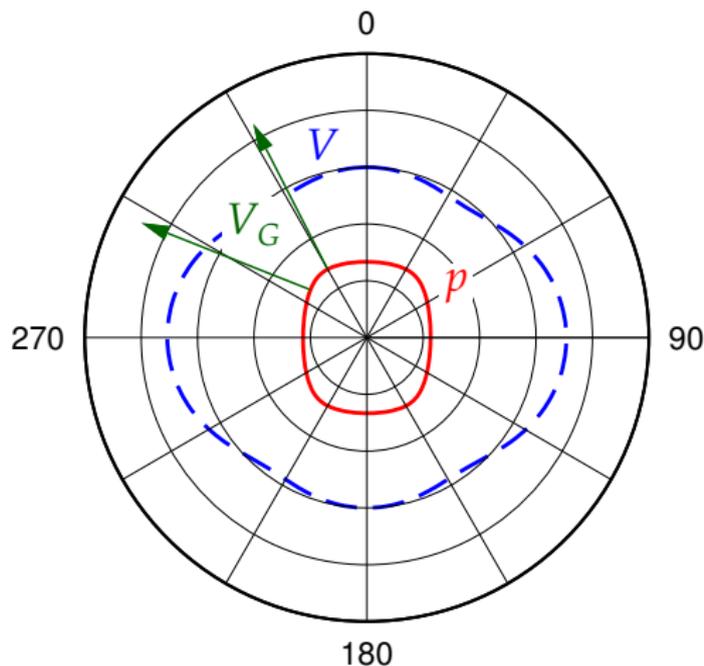
Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références



blue : vitesse de phase V , rouge : surface de lenteur ($1/V$),
vert : vitesse de groupe

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Le vecteur de la vitesse de groupe est obtenu par

$$\mathbf{V}_G = \nabla^{(\mathbf{k})}(kV) = \frac{\partial(kV)}{\partial k_1} \mathbf{i}_1 + \frac{\partial(kV)}{\partial k_2} \mathbf{i}_2 + \frac{\partial(kV)}{\partial k_3} \mathbf{i}_3, \quad (9)$$

où \mathbf{k} est le nombre d'onde (de magnitude $k = \omega/V$);

- $|\mathbf{V}| = (\mathbf{V}_G \cdot \mathbf{n})$
 - La magnitude de la vitesse de groupe est toujours plus grande ou égale à celle de la vitesse de phase correspondante.

Introduction

Théorie de base

Equation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Notation de Voigt : on remplace les paires d'indices ij et kl par $11 \rightarrow 1, 22 \rightarrow 2, 33 \rightarrow 3, 23 \rightarrow 4, 13 \rightarrow 5, 12 \rightarrow 6$, i.e.

$$\begin{bmatrix} c_{1111} & c_{1122} & c_{1133} & c_{1123} & c_{1113} & c_{1112} \\ c_{1122} & c_{2222} & c_{2233} & c_{2223} & c_{2213} & c_{2212} \\ c_{1133} & c_{2233} & c_{3333} & c_{3323} & c_{3313} & c_{3312} \\ c_{1123} & c_{2223} & c_{3323} & c_{2323} & c_{2313} & c_{2312} \\ c_{1113} & c_{2213} & c_{3313} & c_{2313} & c_{1313} & c_{1312} \\ c_{1112} & c_{2212} & c_{3312} & c_{2312} & c_{1313} & c_{1212} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & c_{45} & c_{55} & c_{56} \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & c_{46} & c_{55} & c_{66} \end{bmatrix}$$

- Les milieux tricliniques constituent le cas le plus général;
- On dénombre 21 rigidités indépendantes.

$$\mathbf{c}^{(\text{trc})} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & c_{45} & c_{55} & c_{56} \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & c_{46} & c_{55} & c_{66} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

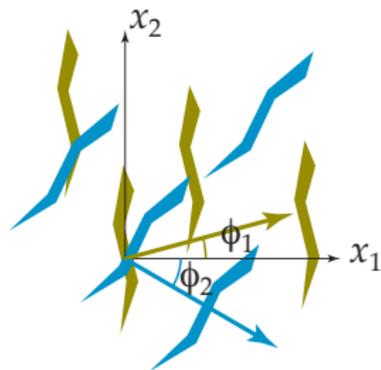
Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Les milieux monocliniques comportent un plan de symétrie ;
- On dénombre 13 rigidités indépendantes ;
- Si le plan de symétrie est orthogonal à l'axe x_3 , nous avons

$$\mathbf{c}^{(mnc)} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & c_{36} \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{45} & c_{55} & 0 \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (11)$$



Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

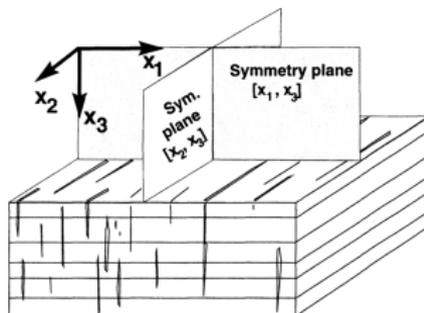
Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Les milieux orthorombiques comportent trois plans de symétrie orthogonaux;
- On dénombre 9 rigidités indépendantes;
- Si les plans de symétrie correspondent à un système cartésien, nous avons



$$\mathbf{c}^{(\text{ort})} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Dans la majorité des cas, et en particulier dans les milieux sédimentaires, les milieux comportent un axe de symétrie radiale, on est en présence d'isotropie transverse;
- On peut caractériser la signature sismique à partir de la direction de propagation et de l'axe de symétrie;
- Le plan perpendiculaire à l'axe de symétrie est nommé plan d'isotropie;
- Lorsque le plan d'isotropie est horizontal (par ex. pour des shales en couches horizontales), on est en présence d'un milieu à isotropie transverse avec axe de symétrie vertical (*VTI media* en anglais), et nous avons 5 rigidités

$$\mathbf{c}^{(vti)} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{11} - 2c_{66} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{11} - 2c_{66} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

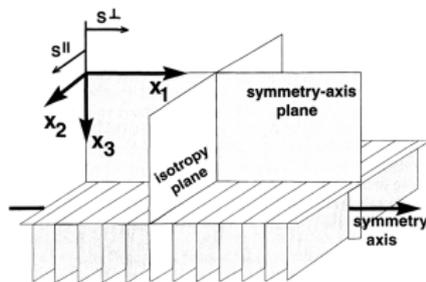
Références

- Lorsque l'axe est incliné (p. ex. shales sur les flancs d'un dôme de sel), on parle de « *tilted transverse isotropy* », ou TTI media ;

- En présence de fissures orientées dans un plan vertical, on parle d'isotropie transverse horizontale (HTI) ;

- Nous avons toujours 5 rigidités indépendantes

$$\mathbf{c}^{(hti)} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{13} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{33} & c_{33} - 2c_{44} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{33} - 2c_{44} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} \end{bmatrix} \quad (14)$$



Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Dans le cas isotrope, nous n'avons plus que 2 constantes indépendantes, les constantes de Lamé λ et μ , et le tenseur vaut

$$\mathbf{c}^{(\text{iso})} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (15)$$

Introduction

Théorie de base

Equation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Exprimer le degré d'anisotropie en termes de rigidités peut s'avérer fastidieux et contre-intuitif;
- Pour les milieux VTI, Thomsen (1986) a défini des paramètres permettant de séparer l'effet de l'anisotropie de celui des vitesses « isotropes » P et S verticales :

$$V_{P0} \equiv \sqrt{\frac{c_{33}}{\rho}}, \quad (16)$$

$$V_{S0} \equiv \sqrt{\frac{c_{55}}{\rho}}, \quad (17)$$

$$\epsilon \equiv \frac{c_{11} - c_{33}}{2c_{33}}, \quad (18)$$

$$\delta \equiv \frac{(c_{13} + c_{55})^2 - (c_{33} - c_{55})^2}{2c_{33}(c_{33} - c_{55})}, \quad (19)$$

$$\gamma \equiv \frac{c_{66} - c_{55}}{2c_{55}}. \quad (20)$$

Introduction

Théorie de base

Equation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Pour un milieu isotrope, ϵ , δ et γ valent zéro.
 - Ces paramètres peuvent donc servir à quantifier le degré d'anisotropie.
- Le paramètre ϵ est à peu près égal à la différence relative entre la vitesse horizontale et la vitesse verticale de l'onde P , et est souvent appelé « anisotropie de l'onde P ».

Note : $V_P(\theta = 90) = \sqrt{c_{11}/\rho}$.
- Similairement, le paramètre γ donne la même mesure pour l'onde SH ;
- Le paramètre δ indique la dépendance angulaire de V_{P0} au voisinage de la verticale, comme le montre la relation

$$\left. \frac{d^2 V_P}{d\theta^2} \right|_{\theta=0} = 2V_{P0}\delta, \quad (21)$$

et est le paramètre déterminant sur la courbure d'indicatrice (*normal-moveout*).

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Les données expérimentales indiquent que ϵ et γ sont généralement positifs;
- Dans les bassins sédimentaires, ϵ varie entre 0.1–0.3 pour des roches modérément anisotropes et 0.3–0.5 (et davantage) pour des shales compacts;
- On observe par ailleurs dans les shales des valeurs modérément positives de δ (0.1–0.2), alors que des successions de lits minces isotropes produisent des valeurs faiblement négatives de ce paramètre;
- Lorsque $\epsilon = \delta$, le front d'onde P est une ellipse et

$$V(\theta) = \sqrt{V_0^2 \cos^2 \theta + V_{90}^2 \sin^2 \theta}; \quad (22)$$

on parle alors d'anisotropie elliptique.

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de
groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase
et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

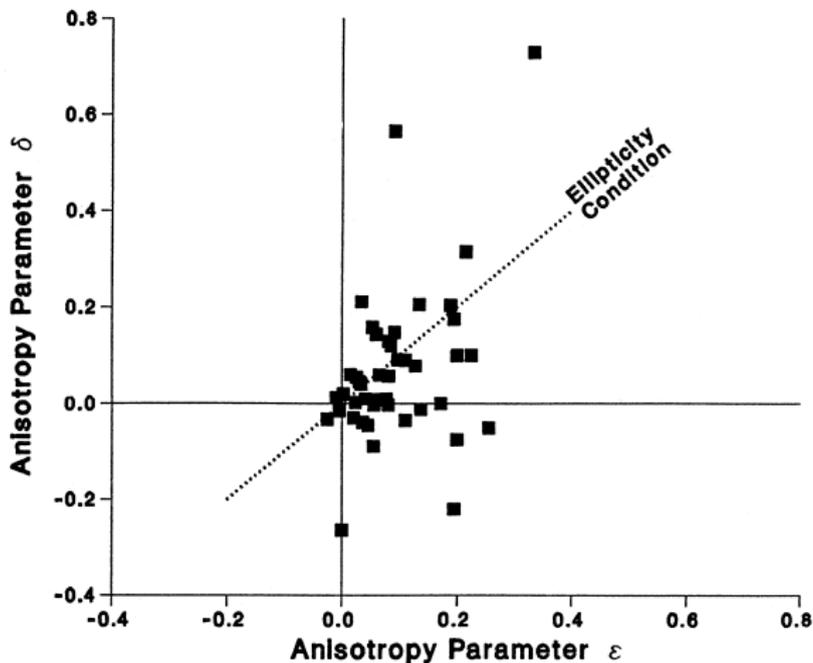
Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références



Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Partant de l'équation de Christoffel, on peut montrer que

$$V_{SH}(\theta) = V_{S0} \sqrt{1 + 2\gamma \sin^2 \theta}. \quad (23)$$

- Pour les ondes P et SV , on arrive à

$$\frac{V^2(\theta)}{V_{P0}^2} = 1 + \epsilon \sin^2 \theta - \frac{f}{2} \pm \frac{f}{2} \sqrt{\left(1 + \frac{2\epsilon \sin^2 \theta}{f}\right)^2 - \frac{2(\epsilon - \delta) \sin^2 2\theta}{f}} \quad (24)$$

$$\text{où } f \equiv 1 - \frac{V_{S0}^2}{V_{P0}^2} = 1 - \frac{c_{55}}{c_{33}}.$$

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- L'expression précédente peut se simplifier si l'anisotropie est faible ($|\epsilon| \ll 1, |\delta| \ll 1$);
- On trouve alors

$$V_P(\theta) = V_{P0}(1 + \delta \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \epsilon \sin^4 \theta) \quad (25)$$

et

$$V_{SV}(\theta) = V_{S0}(1 + \sigma \sin^2 \theta \cos^2 \theta) \quad (26)$$

avec $\sigma = \left(\frac{V_{P0}}{V_{S0}} \right)^2 (\epsilon - \delta)$.

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- La vitesse de groupe est obtenue en appliquant l'équation (9);
- Pour les ondes *SH*, on arrive à

$$V_G = \frac{V_{S0} \sqrt{1 + 2\gamma}}{\sqrt{1 + 2\gamma \cos^2 \psi}} \quad (27)$$

et le front d'onde est une ellipse.

- Pour les ondes *P* et *SV*, le front d'onde n'est pas nécessairement elliptique, et on a que

$$V_G = V \sqrt{1 + \left(\frac{1}{V} \frac{dV}{d\theta} \right)^2}, \quad (28)$$

$$\tan \psi = \frac{\tan \theta + \frac{1}{V} \frac{dV}{d\theta}}{1 - \frac{\tan \theta}{V} \frac{dV}{d\theta}}. \quad (29)$$

Introduction

Théorie de base

Equation d'onde

Vitesse de phase et de
groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase
et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

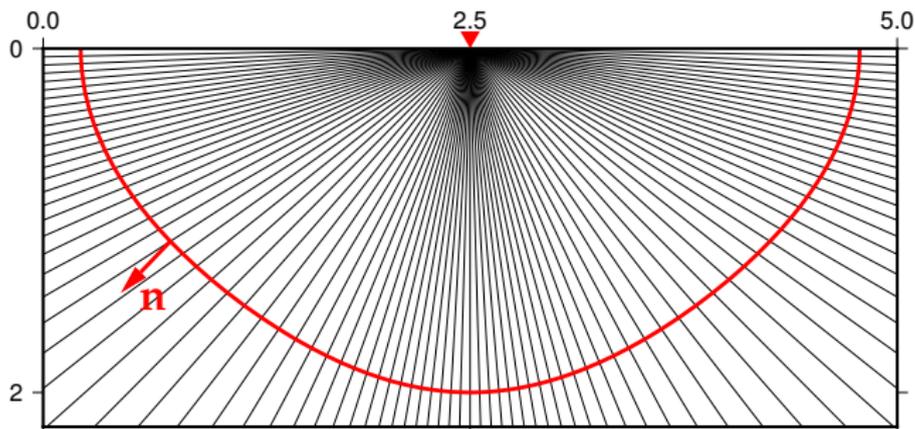
Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Front d'une onde P et rais associés pour un milieu VTI homogène avec $\epsilon=0.15$ et $\delta=-0.1$.



- Les rais sont calculés pour un incrément constant de l'angle de phase θ .

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de
groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase
et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

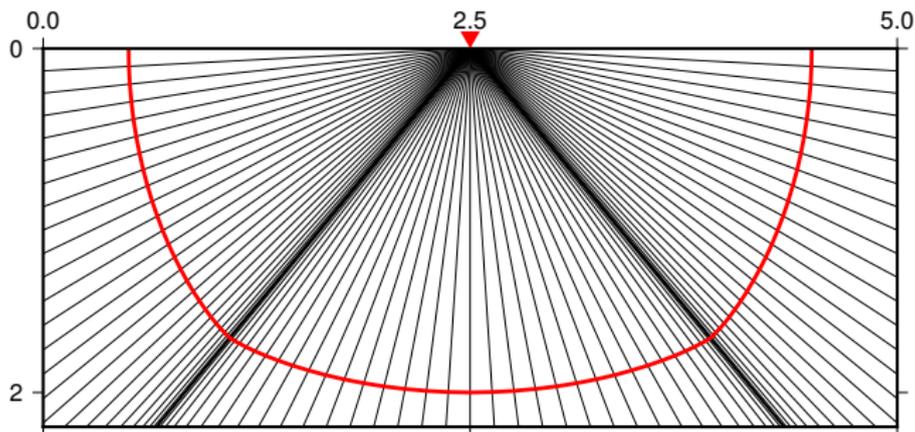
Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Front d'une onde SV et rais associés pour un milieu VTI homogène avec $\epsilon=0.15$, $\delta=-0.1$ et $\sigma=0.42$.



- Les rais sont calculés pour un incrément constant de l'angle de phase θ .

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

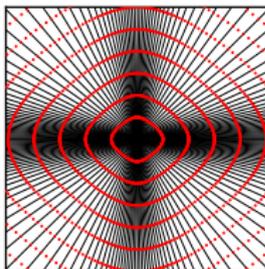
Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

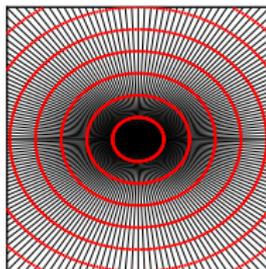
Ondes P – Rais et fronts d'onde en milieux VTI

Green River Shale



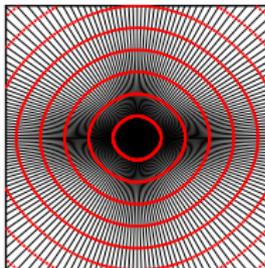
$$\epsilon = 0.195, \delta = -0.22$$

Mesa Clay Shale



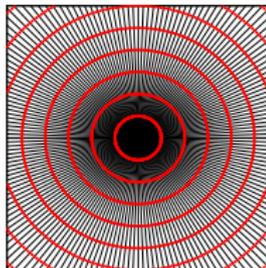
$$\epsilon = 0.189, \delta = 0.204$$

Taylor Sand



$$\epsilon = 0.11, \delta = -0.035$$

Mesa Shale



$$\epsilon = 0.065, \delta = 0.059$$

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de
groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

**VTI – vitesse de phase
et de groupe**

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

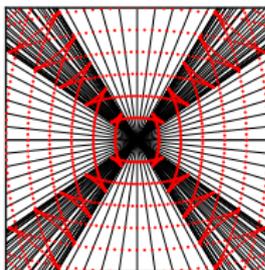
Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

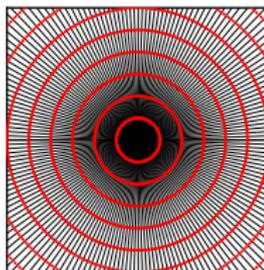
Ondes SV – Rais et fronts d'onde en milieux VTI

Green River Shale



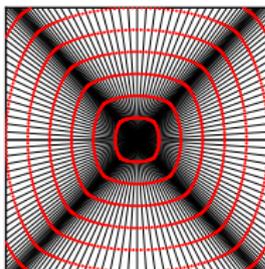
$$\varepsilon = 0.195, \delta = -0.22 \\ \sigma = 1.470$$

Mesa Clay Shale



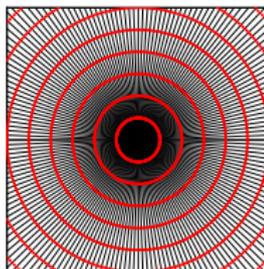
$$\varepsilon = 0.189, \delta = 0.204 \\ \sigma = -0.050$$

Taylor Sand



$$\varepsilon = 0.11, \delta = -0.035 \\ \sigma = 0.490$$

Mesa Shale



$$\varepsilon = 0.065, \delta = 0.059 \\ \sigma = 0.010$$

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de
groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

**VTI – vitesse de phase
et de groupe**

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

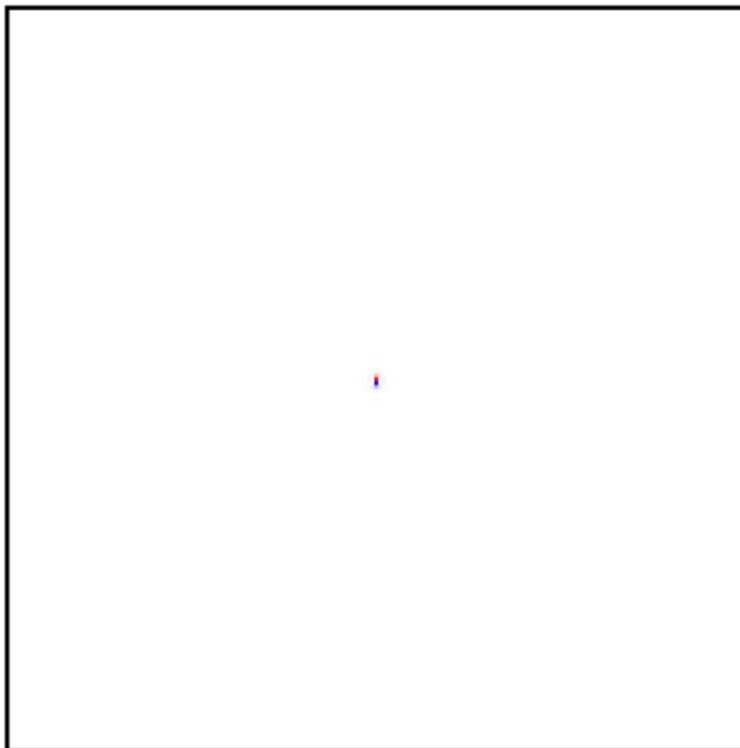
Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

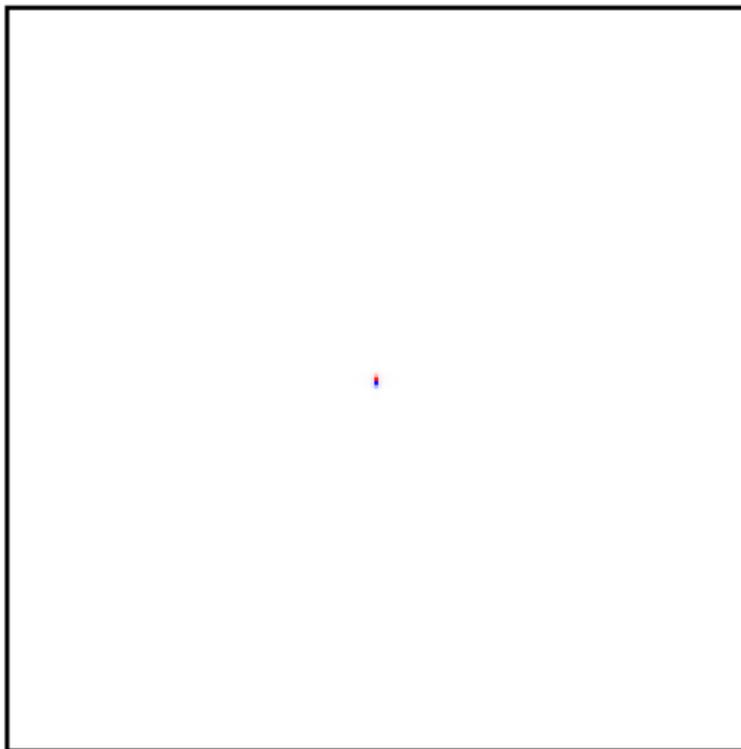
Annexe

Références

$$\varepsilon=0.1 \quad \delta=0.1 \quad \sigma=0$$



$$\varepsilon=0.195 \quad \delta=-0.22 \quad \sigma=1.47$$



Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de
groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

**VTI – vitesse de phase
et de groupe**

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

Introduction

Théorie de base

Equation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Backus (1962) a montré qu'un milieu stratifié (hétérogène) composé de couches (isotropes ou non) se comporte comme un milieu anisotrope homogène à la limite des grandes longueurs d'onde;
- Soit un système à isotropie transverse arbitrairement orienté, le tenseur des rigidités peut s'écrire

$$\begin{bmatrix} a & b & f & 0 & 0 & 0 \\ b & a & f & 0 & 0 & 0 \\ f & f & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m \end{bmatrix}, \quad m = \frac{1}{2}(a - b) \quad (30)$$

où a, b, c, d et f sont les cinq constantes indépendantes.

- Définissons l'opérateur $\langle \cdot \rangle$ comme la moyenne des propriétés pondérées par leur fraction volumique.

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Backus a montré que le tenseur des rigidités effectives vaut

$$\begin{bmatrix} A & B & F & 0 & 0 & 0 \\ B & A & F & 0 & 0 & 0 \\ F & F & C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M \end{bmatrix}, \quad M = \frac{1}{2}(A - B) \quad (31)$$

où

- $A = \langle a - f^2 c^{-1} \rangle + \langle c^{-1} \rangle^{-1} \langle f c^{-1} \rangle^2;$
- $B = \langle b - f^2 c^{-1} \rangle + \langle c^{-1} \rangle^{-1} \langle f c^{-1} \rangle^2;$
- $C = \langle c^{-1} \rangle^{-1};$
- $F = \langle c^{-1} \rangle^{-1} \langle f c^{-1} \rangle;$
- $D = \langle d^{-1} \rangle^{-1};$
- $M = \langle m \rangle.$

Introduction

Théorie de base

Équation d'onde

Vitesse de phase et de groupe

Symétries

Paramètres de Thomsen

VTI – vitesse de phase et de groupe

Méthode de Backus

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Si les couches individuelles sont isotropes, nous avons $a = c = \lambda + 2\mu$, $b = f = \lambda$ et $d = m = \mu$;
- Pour le milieu effectif, nous avons alors :
 - $A = \left\langle \frac{4\mu(\lambda+\mu)}{\lambda+2\mu} \right\rangle + \left\langle \frac{1}{\lambda+2\mu} \right\rangle^{-1} \left\langle \frac{\lambda}{\lambda+2\mu} \right\rangle^2$;
 - $B = \left\langle \frac{2\mu\lambda}{\lambda+2\mu} \right\rangle + \left\langle \frac{1}{\lambda+2\mu} \right\rangle^{-1} \left\langle \frac{\lambda}{\lambda+2\mu} \right\rangle^2$;
 - $C = \left\langle \frac{1}{\lambda+2\mu} \right\rangle^{-1}$;
 - $F = \left\langle \frac{1}{\lambda+2\mu} \right\rangle^{-1} \left\langle \frac{\lambda}{\lambda+2\mu} \right\rangle$;
 - $D = \left\langle \frac{1}{\mu} \right\rangle^{-1}$;
 - $M = \langle \mu \rangle$.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Amplitude au champ
lointain

Coefficient de réflexion

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

Anisotropie et AVO

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Amplitude au champ lointain

Coefficient de réflexion

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- En analyse AVO, on étudie la variation du coefficient de réflexion en fct de l'angle d'incidence (et non la variation de l'amplitude comme le nom l'indique...);
- Comme on peut s'en douter, le coefficient de réflexion entre deux milieux sera affecté par une anisotropie (d'un ou des deux milieux);
- Si la ou les couches supérieures sont anisotropes, la propagation (et l'amplitude) de l'onde sera conditionnée par cette anisotropie;
 - on observe une focalisation ou « défocalisation » de l'énergie respectivement dans les zones de plus ou moins forte concentration de rais sismiques;
 - il faut pouvoir corriger ces effets pour calculer correctement les coefficients de réflexion.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

 Amplitude au champ
lointain

Coefficient de réflexion

Anisotropie et NMO

 Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

 Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Pour les milieux VTI à faible anisotropie, une source ponctuelle \mathbf{F} à l'origine et un récepteur à (r, z) , l'amplitude au champ lointain est (Tsvankin, 2005)

$$A(R, \theta) = \frac{F_u}{\underbrace{4\pi\rho V^2(\theta)R}_{\text{isotrope}}} \frac{1}{\sqrt{\frac{\sin \psi}{\sin \theta} \left(1 + \frac{1}{V} \frac{d^2V}{d\theta^2}\right)}}, \quad (32)$$

où $R = \sqrt{z^2 + r^2}$ et F_u est la projection de \mathbf{F} sur le vecteur de déplacement.

- Pour une onde P , nous avons (sous condition $|\epsilon| \ll 1$, $|\delta| \ll 1$)

$$A_P(R, \theta) = \frac{F_u}{4\pi\rho V_{P0}^2 R} \frac{1 - 2(\epsilon - \delta) \sin^2 2\theta + \delta \sin^2 \theta}{1 + 2\delta}. \quad (33)$$

- Pour une onde SV , nous avons (sous condition $|\sigma| \ll 1$)

$$A_{SV}(R, \theta) = \frac{F_u}{4\pi\rho V_{S0}^2 R} \frac{1 - 2\sigma \sin^2 2\theta + \sigma \sin^2 \theta}{1 + 2\sigma}. \quad (34)$$

Amplitude au champ lointain

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Amplitude au champ lointain

Coefficient de réflexion

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

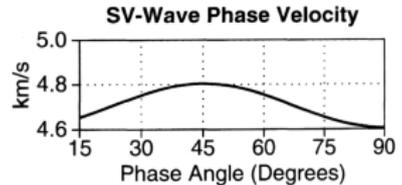
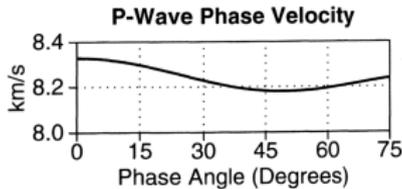
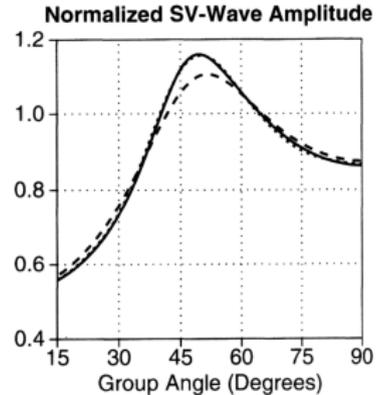
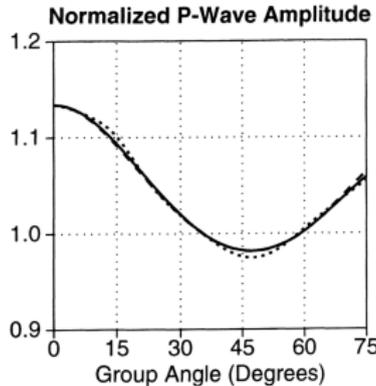
Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- $V_{P0}=8328 \text{ m/s}$, $V_{S0}=4606 \text{ m/s}$, $\epsilon=-0.008$, $\delta=-0.059$, $\sigma=0.168$.

Traits pleins : eqns (33) et (34), pointillés : solutions exactes



courbes normalisées p/r amplitude réfléchiée pour milieu isotrope

Amplitude au champ lointain

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Amplitude au champ lointain

Coefficient de réflexion

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

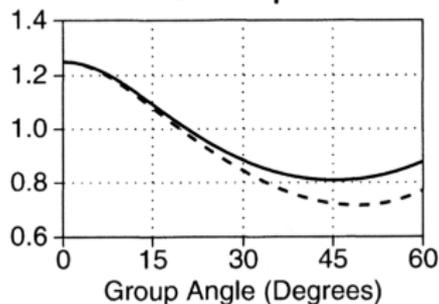
Annexe

Références

$$\varepsilon - \delta = 0.2$$

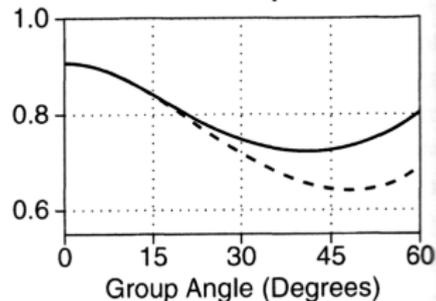
$$\varepsilon = 0.1 \quad \delta = -0.1$$

P-Wave Amplitude

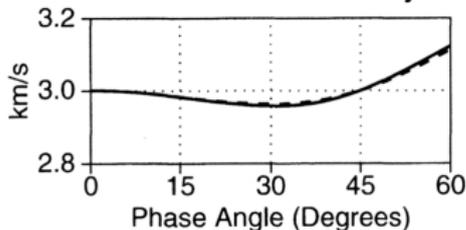


$$\varepsilon = 0.25 \quad \delta = 0.05$$

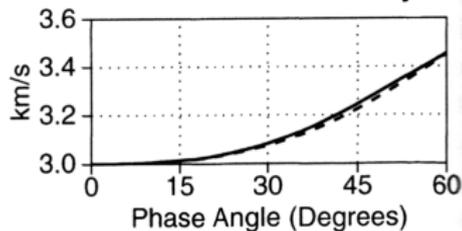
P-Wave Amplitude



P-Wave Phase Velocity



P-Wave Phase Velocity



courbes normalisées p/r amplitude réfléchi pour milieu isotrope

Amplitude au champ lointain

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Amplitude au champ lointain

Coefficient de réflexion

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

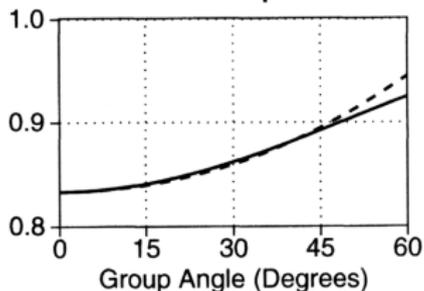
Annexe

Références

$\varepsilon - \delta = 0$ (Elliptical Anisotropy)

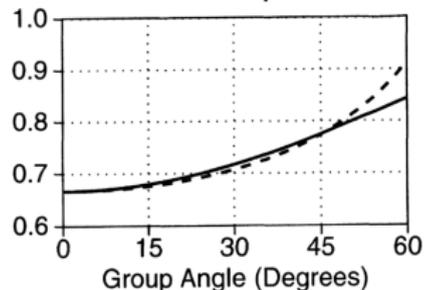
$\varepsilon = \delta = 0.1$

P-Wave Amplitude

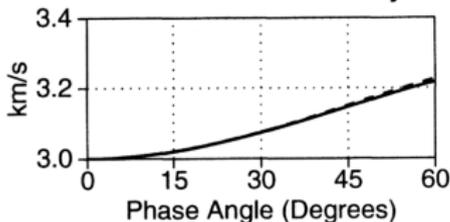


$\varepsilon = \delta = 0.25$

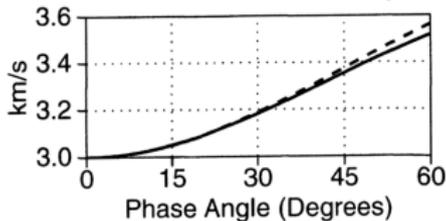
P-Wave Amplitude



P-Wave Phase Velocity



P-Wave Phase Velocity



courbes normalisées p/r amplitude réfléchie pour milieu isotrope

Amplitude au champ lointain

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Amplitude au champ lointain

Coefficient de réflexion

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

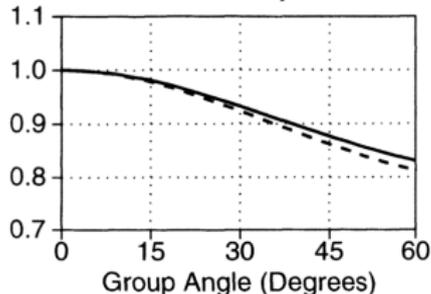
Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

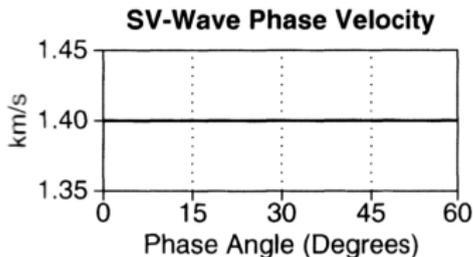
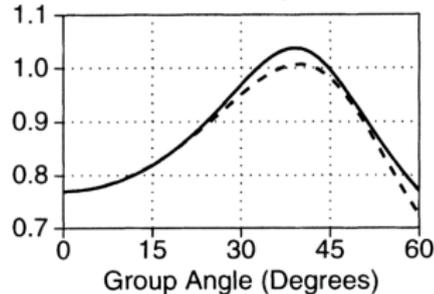
$$\sigma=0 \quad (\varepsilon=\delta=0.2)$$

SV-Wave Amplitude

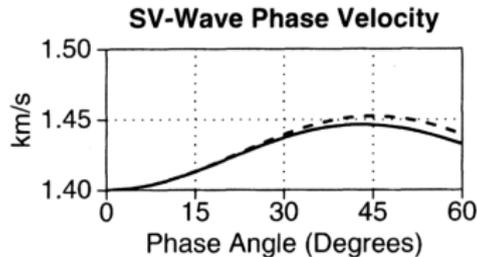


$$\sigma=0.15 \quad (\varepsilon=0.1, \delta=0.05)$$

SV-Wave Amplitude



a



b

courbes normalisées p/r amplitude réfléchi pour milieu isotrope

Amplitude au champ lointain

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Amplitude au champ lointain

Coefficient de réflexion

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

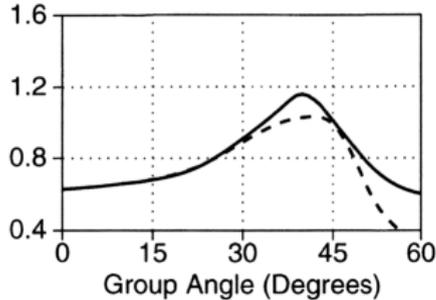
Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

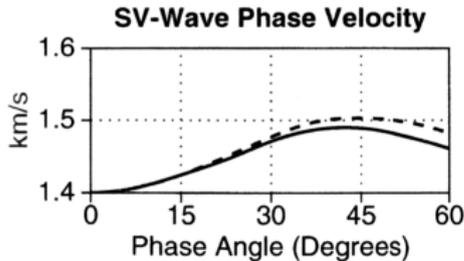
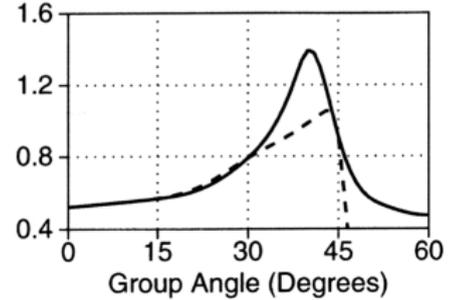
$$\sigma=0.3 \quad (\varepsilon=0.15, \delta=0.05)$$

SV-Wave Amplitude

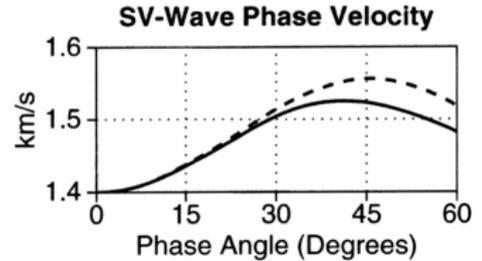


$$\sigma=0.45 \quad (\varepsilon=0.2, \delta=0.05)$$

SV-Wave Amplitude



a



b

courbes normalisées p/r amplitude réfléchi pour milieu isotrope

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Amplitude au champ
lointain

Coefficient de réflexion

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- En utilisant l'approximation de faible anisotropie ($|\epsilon| \ll 1, |\delta| \ll 1$), il est possible de décomposer le coefficient de réflexion d'une onde plane en deux composantes

$$R(\theta) = R_{iso}(\theta) + R_{aniso}(\theta). \quad (35)$$

- Pour les ondes P , la composante due à l'anisotropie est

$$R_{aniso,P}(\theta) = \frac{1}{2}(\delta_2 - \delta_1) \sin^2 \theta + \frac{1}{2}(\epsilon_2 - \epsilon_1) \sin^2 \theta \tan^2 \theta, \quad (36)$$

(les indices 1 et 2 réfèrent aux couches supérieure et inférieure respectivement)

- Note : un traitement détaillé du coefficient de réflexion est donné par Rüger (2001).

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Amplitude au champ
lointain

Coefficient de réflexion

Anisotropie et NMO

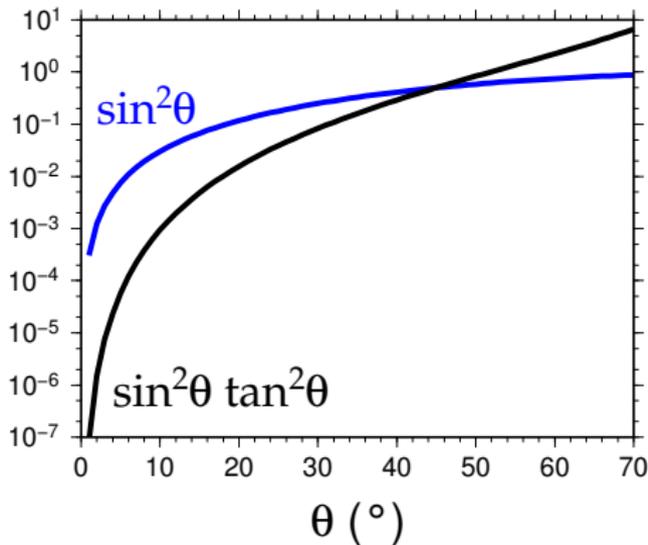
Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Le paramètre δ a une influence prépondérante au dépôts courts;

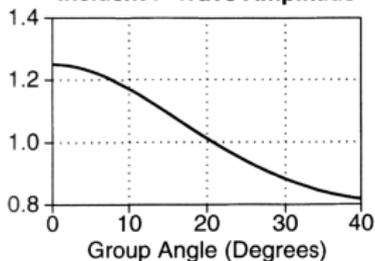


Coefficient de réflexion

- Couche inférieure isotrope (cas shale / grès);
- Haut : Ampl. norm. iso., bas : $R_{aniso,P}(\theta)$ avec $\epsilon_2 = \delta_2 = 0$.

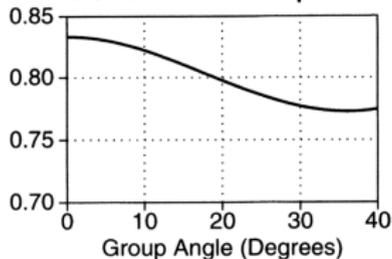
$\epsilon=0.1$ $\delta=-0.1$

Incident P-Wave Amplitude

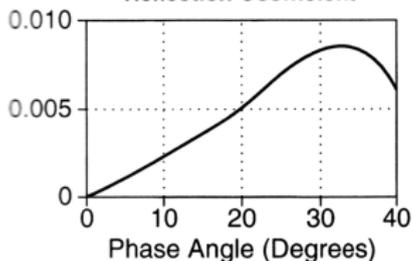


$\epsilon=0.2$ $\delta=0.1$

Incident P-Wave Amplitude

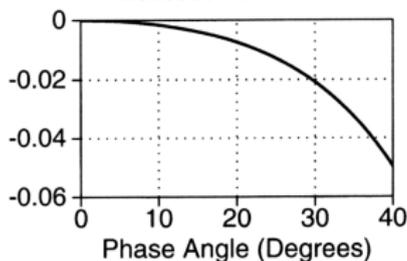


Reflection Coefficient



a

Reflection Coefficient



b

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Amplitude au champ lointain

Coefficient de réflexion

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Amplitude au champ
lointain

Coefficient de réflexion

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Le gradient AVO (terme G de Shuey) aux angles faibles ($<30^\circ$) contient une contribution significative des paramètres d'anisotropie ;
 - pour les ondes $P \rightarrow \delta$ est prépondérant ;
 - pour les ondes $SV \rightarrow \sigma$ est prépondérant.
- Pour l'application type d'un shale au dessus d'un grès saturé en gaz, la contribution anisotrope à G est comparable à la contribution isotrope et *négative*, en particulier pour les ondes S , et ce même pour les faibles degrés d'anisotropie ;
- La focalisation et défocalisation de l'énergie dans les couches supérieures peut causer une variation et même un changement de signe du gradient AVO ;
 - Il faut une approche de traitement intégrée qui tient compte de l'anisotropie à tout les niveaux, de la propagation aux coefficients de réflexion.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation
alternative

Conversion
temps-profondeur

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

Anisotropie et NMO

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation
alternative

Conversion
temps-profondeur

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Le temps de parcours en fonction du départ x pour des données en CMP est communément approximé par une expansion en série de Taylor

$$t^2 = A_0 + A_2x^2 + A_4x^4 + \dots, \quad (37)$$

où les coefficients sont

$$A_0 = t_0^2, \quad A_2 = \left. \frac{d(t^2)}{d(x^2)} \right|_{x=0}, \quad A_4 = \frac{1}{2} \left. \frac{d}{d(x^2)} \left[\frac{d(t^2)}{d(x^2)} \right] \right|_{x=0}; \quad (38)$$

t_0 est le temps double à $x = 0$.

- La vitesse NMO décrit un *moveout* hyperbolique et est obtenue en ne considérant que les deux premiers termes

$$t_{\text{hyp}}^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V_{\text{nmo}}^2}, \quad V_{\text{nmo}}^2 = \frac{1}{A_2} = \left. \frac{d(x^2)}{d(t^2)} \right|_{x=0}. \quad (39)$$

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation
alternative

Conversion
temps-profondeur

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- L'anisotropie entraîne deux distorsions principales :
 - la vitesse NMO n'est pas équivalente à la vitesse RMS valide pour les milieux isotropes. Ceci cause des erreurs dans la conversion temps-profondeur et produit des images migrées en profondeurs (avec les algorithmes conventionnels) avec un axe vertical erroné;
 - la courbure d'indicatrice n'est pas hyperbolique, et la sommation sera dégradée.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation alternative

Conversion temps-profondeur

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

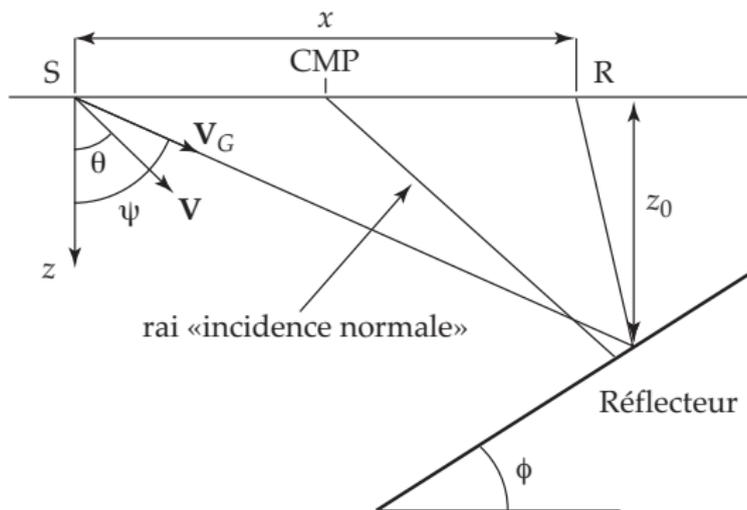
Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- Tsvankin a montré que

$$V_{\text{nmo}}(\phi) = \frac{V(\phi)}{\cos \phi} \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{V(\phi)} \frac{d^2V}{d\theta^2} \Big|_{\theta=\phi}}}{1 - \frac{\tan \phi}{V(\phi)} \frac{dV}{d\theta} \Big|_{\theta=\phi}}. \quad (40)$$



Équations NMO 2D dans une couche anisotrope

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation
alternative

Conversion
temps-profondeur

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Si le réflecteur est horizontal ($\phi = 0$), l'équation (40) se simplifie à

$$V_{\text{nmo}}(0) = V(0) \sqrt{1 + \frac{1}{V(0)} \left. \frac{d^2 V}{d\theta^2} \right|_{\theta=0}} \quad (41)$$

- Nous avons pour les modes P , SV et SH (couche VTI)

$$V_{\text{nmo},P}(0) = V_{P0} \sqrt{1 + 2\delta}; \quad (42)$$

$$V_{\text{nmo},SV}(0) = V_{S0} \sqrt{1 + 2\sigma}; \quad (43)$$

$$V_{\text{nmo},SH}(0) = V_{S0} \sqrt{1 + 2\gamma}. \quad (44)$$

Ces équations sont valides indépendamment de l'intensité de l'anisotropie.

- Les équations pour $\phi \neq 0$ en milieu VTI obtenues pour $|\epsilon| \ll 1, |\delta| \ll 1$ sont données par Tsvankin (2005).

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation
alternative

Conversion
temps-profondeur

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Lorsque $\phi \neq 0$ en milieu VTI et que $|\epsilon| \ll 1, |\delta| \ll 1$, nous avons

$$V_{\text{nmo}}(\phi) = \frac{V_P(\phi)}{\cos \phi} \left[1 + \delta + 2(\epsilon - \delta) \sin^2 \phi (1 + 2 \cos^2 \phi) \right]; \quad (45)$$

- Examinons comment se comporte (45) par rapport à un réflecteur horizontal, pour lequel

$$V_{\text{nmo}}(0) = V_{P0}(1 + \delta);$$

- En utilisant ces deux équations, on trouve

$$\frac{V_{\text{nmo}}(\phi) \cos \phi}{V_{\text{nmo}}(0)} = \underbrace{1 + \delta \sin^2 \phi + 3(\epsilon - \delta) \sin^2 \phi (2 - \sin^2 \phi)}_{\text{«erreur DMO»}}, \quad (46)$$

où l'erreur DMO correspond à l'erreur faite si on considère que le milieu est isotrope.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation
alternative

Conversion
temps-profondeur

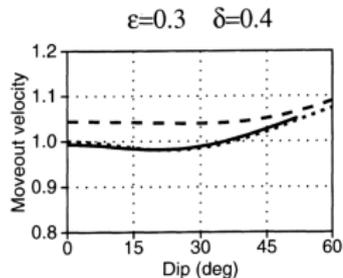
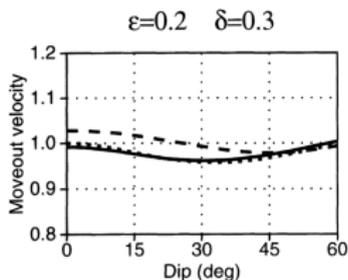
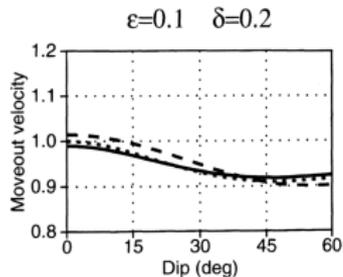
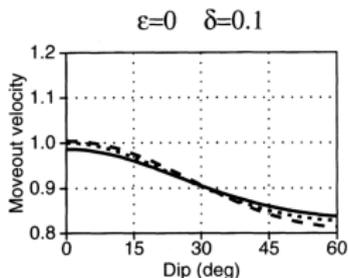
Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

$$\varepsilon - \delta = -0.1$$



Trait plein : méthode t^2-x^2 , pointillé : solution exacte,
trait tireté : solution $|\varepsilon| \ll 1, |\delta| \ll 1$ (équ. (45))

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation

alternative

Conversion

temps-profondeur

Courbure

d'indicatrice non

hyperbolique

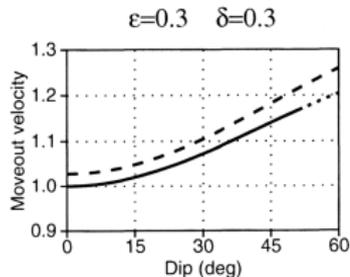
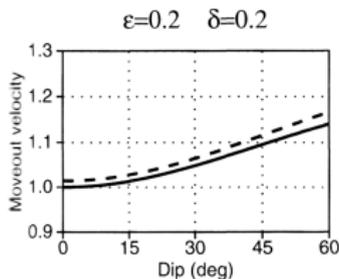
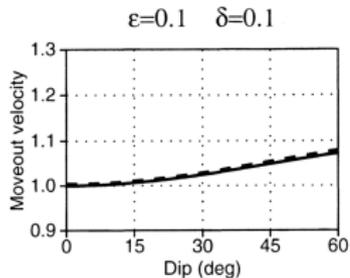
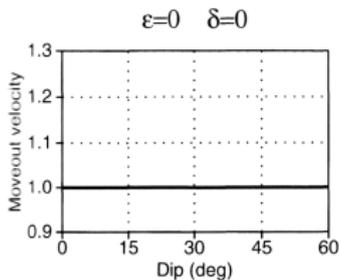
Estimation de

l'anisotropie

Annexe

Références

$\epsilon - \delta = 0$ (Elliptical)



Trait plein : méthode t^2-x^2 , pointillé : solution exacte,
 tireté : solution $|\epsilon| \ll 1, |\delta| \ll 1$ (équ. (45))

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation

alternative

Conversion

temps-profondeur

Courbure

d'indicatrice non

hyperbolique

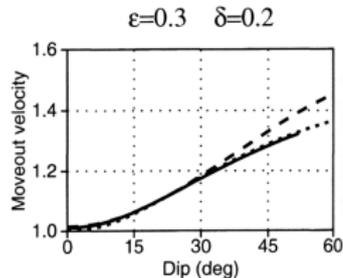
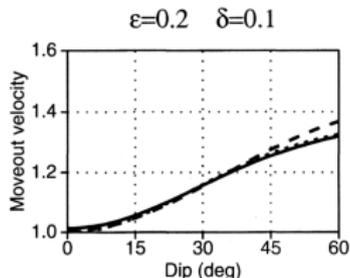
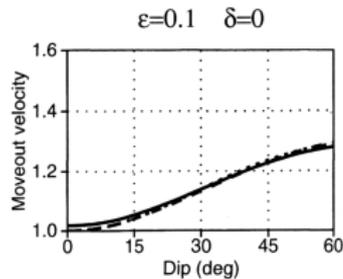
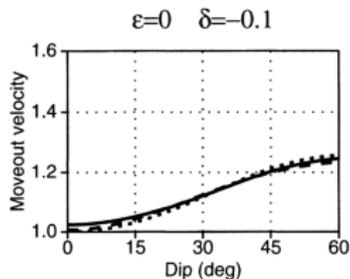
Estimation de

l'anisotropie

Annexe

Références

$\epsilon - \delta = 0.1$



Trait plein : méthode t^2-x^2 , pointillé : solution exacte,
tireté : solution $|\epsilon| \ll 1, |\delta| \ll 1$ (équ. (45))

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation
alternative

Conversion
temps-profondeur

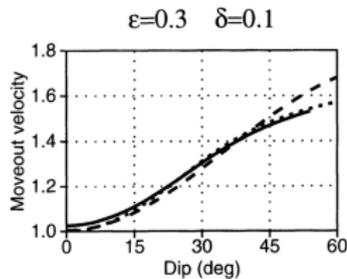
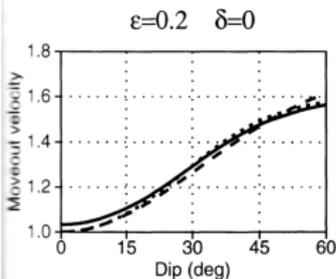
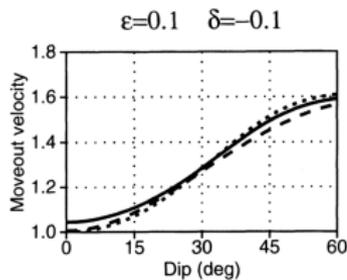
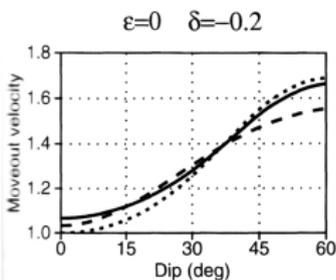
Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

$$\varepsilon - \delta = 0.2$$



Trait plein : méthode t^2-x^2 , pointillé : solution exacte,
tiré : solution $|\varepsilon| \ll 1, |\delta| \ll 1$ (éq. (45))

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation
alternative

Conversion
temps-profondeur

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Il est possible d'exprimer l'équation (40) en termes des composantes horizontale ($p = \sin \theta / V$) et verticale ($q = \cos \theta / V$) du vecteur de lenteur (Cohen, 1998)

$$V_{\text{nmo}}(p) = \sqrt{\frac{q''}{pq' - q}} \Big|_{p(\phi)}. \quad (47)$$

où $q' \equiv dq/dp$ et $q'' = d^2q/dp^2$;

- Cette expression est évaluée pour le rai déport-nul ($p = \sin \phi / V$) et vertical ($q = \cos \phi / V$);
- Cette formulation a une application directe en analyse de vitesse, inversion et pour différentes étapes du traitement.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation alternative

Conversion temps-profondeur

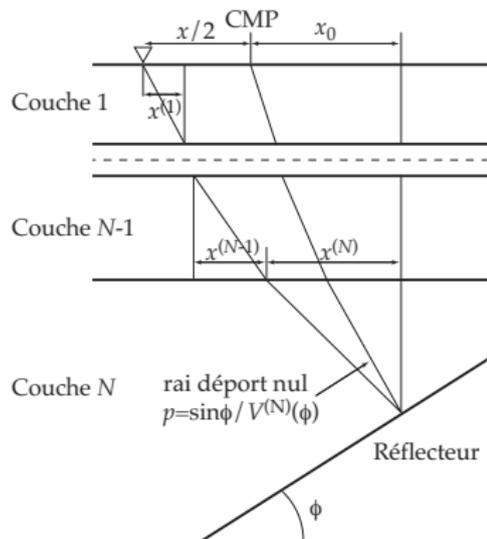
Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- L'équation NMO pour des réflecteurs inclinés est obtenue à partir du paramètre du rai p (qui correspond à la lenteur horizontale);
- Hypothèse : le plan d'incidence est un plan de symétrie de l'anisotropie;
- $V^{(N)}$ est la vitesse de phase dans la N^e couche, $x^{(i)}$ est le déplacement horizontal du rai;



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation
alternative

Conversion
temps-profondeur

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- La vitesse NMO pour le modèle de la diapo précédente est

$$V_{\text{nmo}}^2(N) = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^N \left[V_{\text{nmo}}^{(i)}(p) \right]^2 t_0^{(i)}(p), \quad (48)$$

où

- $t_0^{(i)}(p)$ est le temps de parcours dans la couche i pour le rai déport nul. Note : $t_0(p) = t_0(0)V_{p0}(q - pq')$;
 - $t_0 = \sum_{i=1}^N t_0^{(i)}$;
 - $V_{\text{nmo}}^{(i)}(p)$ est la vitesse d'intervalle NMO pour le rai p .
- On peut appliquer la formule de Dix pour retrouver les vitesses d'intervalle

$$\left[V_{\text{nmo}}^{(i)} \right]^2 = \frac{V_{\text{nmo}}^2(i)t_0(i) - V_{\text{nmo}}^2(i-1)t_0(i-1)}{t_0(i) - t_0(i-1)}, \quad (49)$$

où ici $t_0(i-1)$ et $t_0(i)$ sont les temps doubles des couches supérieure et inférieure.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation
alternative

Conversion
temps-profondeur

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Pour un réflecteur horizontal, on peut montrer que la vitesse NMO est reliée à la vitesse RMS par

$$V_{\text{nmo}}^2(N) = V_{0,\text{rms}}^2 (1 + 2\zeta), \quad (50)$$

où $V_{0,\text{rms}}$ est la moyenne RMS (pondérée par $t_0^{(i)}$) de la vitesse verticale vraie et ζ est la moyenne du paramètre d'anisotropie de l'onde considérée

$$\zeta = \frac{1}{V_{0,\text{rms}}^2 t_0} \sum_{i=1}^N [V_0^{(i)}]^2 \zeta^{(i)} t_0^{(i)}, \quad (51)$$

ζ étant δ pour l'onde P , ϵ pour l'onde SV et γ pour l'onde SH .

- L'équation (50) nous indique que l'erreur relative sur la profondeur vaut $\approx \zeta$, i.e. si $\zeta = 0.1$, l'erreur est $\approx 10\%$.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

**Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique**

Onde P – milieu VTI

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

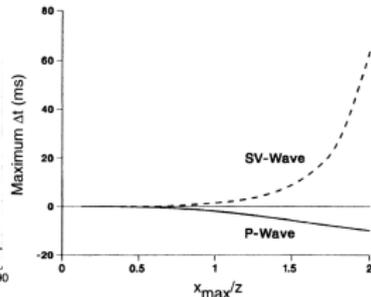
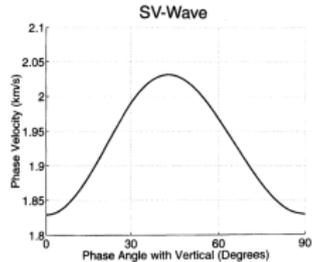
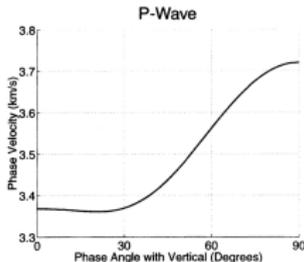
Onde P – milieu VTI

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Le canevas NMO est valable lorsque le dispositif d'acquisition est de longueur inférieure à la distance entre le CMP et le réflecteur ;
- Pour des dépôts plus longs, la courbure d'indicatrice n'est plus hyperbolique et l'utilisation du modèle NMO ne permet pas de bien corriger la courbure ;
- Une solution est de considérer les termes d'ordre supérieurs à 2 dans la série de Taylor (37).



Grès de Taylor : $V_{P0}=3368$ m/s, $V_{S0}=1829$ m/s, $\epsilon=0.110$, $\gamma=-0.035$, $\sigma=0.492$.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Onde P – milieu VTI

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Le terme d'ordre 4 pour l'onde P vaut

$$A_{4,P} = -\frac{2(\epsilon - \delta)(1 + 2\delta/f)}{t_{P0}^2 V_{P0}^4 (1 + 2\delta)^4}, \quad (52)$$

avec $f \equiv 1 - V_{S0}^2/V_{P0}^2$;

- Une solution assez précise et plus pratique est obtenue en posant que le ratio V_{S0}^2/V_{P0}^2 est négligeable ($f = 1$), ce qui donne

$$A_{4,P} = -\frac{2(\epsilon - \delta)}{t_{P0}^2 V_{P0}^4 (1 + 2\delta)^3} = -\frac{2\eta}{t_{P0}^2 V_{nmo}^4}, \quad (53)$$

où $V_{nmo} \equiv V_{nmo}(0)$ et η décrit l'« inellipticité », et vaut par définition

$$\eta \equiv \frac{\epsilon - \delta}{1 + 2\delta}. \quad (54)$$

- η est central pour le traitement de l'anisotropie en temps.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

 Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Onde P – milieu VTI

 Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

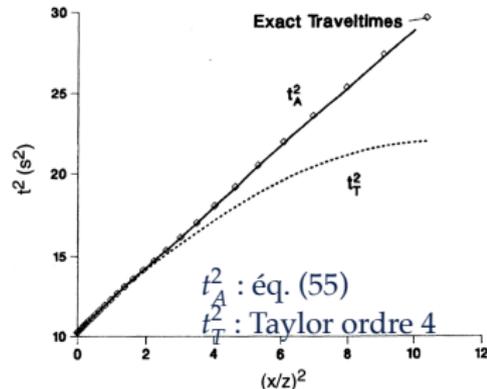
- Même en utilisant le terme d'ordre 4, l'erreur est non négligeable pour les longs dépôts;
- Une bonne approximation est donnée par Tsvankin and Thomsen (1994)

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V_{\text{nmo}}^2} + \frac{A_4 x^4}{1 + Ax^2} \quad (55)$$

$$\text{où } A \equiv \frac{A_4}{V_{90}^{-2} - V_{\text{nmo}}^{-2}};$$

- En terme de η , nous avons

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V_{\text{nmo}}^2} + \frac{2\eta x^4}{V_{\text{nmo}}^2 [t_0^2 V_{\text{nmo}}^2 + (1 + 2\eta)x^2]}. \quad (56)$$



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

**Estimation de
l'anisotropie**

Méthode TZO

Exemple - méthode
TZO

Analyse de vitesse -
exemple

Annexe

Références

Estimation de l'anisotropie

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

Exemple - méthode
TZO

Analyse de vitesse -
exemple

Annexe

Références

- Une fois que la présence d'anisotropie est détectée, il faut la quantifier pour effectuer les corrections nécessaires ;
- Cette tâche est difficile, en particulier si l'on veut migrer les données en profondeur ;
 - seulement pour un milieu VTI simple, il faut déterminer 4 paramètres (V_{p0} , V_{s0} , δ , ϵ) ;
 - il faut pouvoir recourir à des mesures 3C, des VSP, tomo entre trous).
- Dans le cas de traitement des ondes P dans le domaine du temps, la situation est moins compliquée.
- Si le milieu VTI contient un réflecteur incliné sous des couches horizontales, on peut effectuer les traitements en temps (NMO, DMO, migration avant et après sommation) en connaissant $V_{nmo}(0)$ et η dans chaque couche ;
- Ces deux paramètres peuvent être obtenus à partir de la courbure d'indicatrice non hyperbolique, donc en utilisant seulement les réflexions des ondes P mesurées en surface.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

Exemple - méthode
TZO

Analyse de vitesse -
exemple

Annexe

Références

- Il n'y a pas de procédure unique pour déterminer η ;
- En présence de réflecteurs horizontaux et inclinés, on peut procéder à partir des équations (47) et (48) (méthode « TZO » *transformation to zero offset*);
- Dans le cas de réflecteurs horizontaux, on travaille avec le formalisme de la courbure d'indicatrice non hyperbolique;
- Chaque approche comporte des variantes algorithmiques détaillées dans Tsvankin (2005).

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

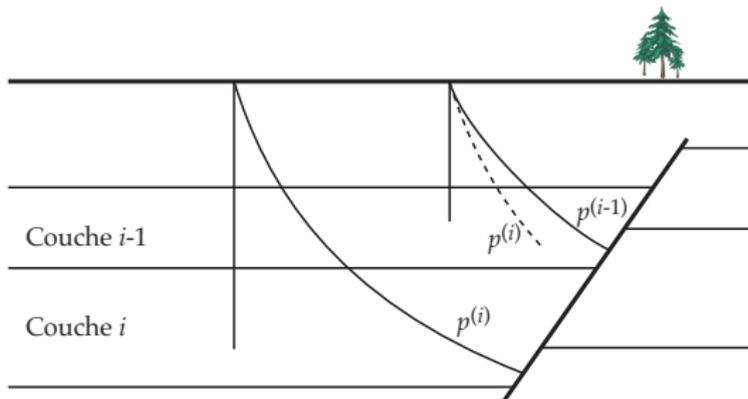
Exemple - méthode
TZO

Analyse de vitesse -
exemple

Annexe

Références

- L'idée consiste à utiliser l'équation de la vitesse NMO pour un réflecteur incliné, i.e. l'équation (48).



- On part du fait que pour les réflecteurs horizontaux, la vitesse NMO est un estimé de $V_{\text{nmo}}(p = 0)$.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Méthode TZO

Exemple - méthode TZO

Analyse de vitesse - exemple

Annexe

Références

- On cherche d'abord la vitesse d'intervalle NMO à partir de la vitesse NMO pointée pour $p = 0$;
- On part de l'équation (48) de Dix anisotrope sous une forme intégrale, exprimée en utilisant (47), soit

$$V_{\text{nmo}}^2(p, t_0) = \frac{1}{t_0(p)} \int_0^{t_0(p)} \frac{q''}{pq' - q} dt \quad (57)$$

où l'intégration se fait le long du rai (oblique);

- Le temps de parcours oblique (dt) est lié au temps d'intervalle vertical ($d\tau$) par

$$dt = V_{P0}(q - pq')d\tau, \quad (58)$$

ce qui nous amène à

$$V_{\text{nmo}}^2(p, \tau) = -\frac{1}{t_0(p, \tau)} \int_0^\tau V_{P0}(\xi)q''(\xi)d\xi, \quad (59)$$

où ξ a la signification de temps vertical (référentiel des mesures);

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

Exemple - méthode
TZO

Analyse de vitesse -
exemple

Annexe

Références

- Le temps déport nul correspondant à $V_{\text{nmo}}^2(p, \tau)$ est obtenu en intégrant (58)

$$t_0(p, \tau) = \int_0^\tau V_{P0}(\xi)[q(\xi) - pq'(\xi)]d\xi. \quad (60)$$

- On trouve la vitesse d'intervalle en posant $p = 0$, et en procédant à l'inversion de

$$V_{\text{nmo}}^2(p = 0, \tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau V_{\text{nmo,int}}^2(0, \xi)d\xi, \quad (61)$$

- Note 1 : $V_{\text{nmo,int}}^2 = V_{P0,int}^2(1 + 2\delta_{\text{int}})$;
- Note 2 : cette procédure est numériquement instable. Une solution est d'approximer $V_{\text{nmo,int}}$ par un polynôme et d'inverser pour les coefficients du polynôme.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

Exemple - méthode
TZO

Analyse de vitesse -
exemple

Annexe

Références

- À partir de (59) et (60) et en utilisant (56), on peut ensuite trouver η_{int} par inversion ;
 - Les données d'entrée sont $V_{\text{nmo}}^2(p, t_0)$ et les valeurs correspondantes de p et de t_0 sur la section déport nul ;
 - On peut déterminer ces paramètres à partir des sections sommées à vitesse constante ou avec la semblance ;
 - p est la pente du réflecteur sur la section déport nul ;
 - Comme pour $V_{\text{nmo, int}}$, on peut approximer η_{int} par un polynôme pour stabiliser les calculs.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

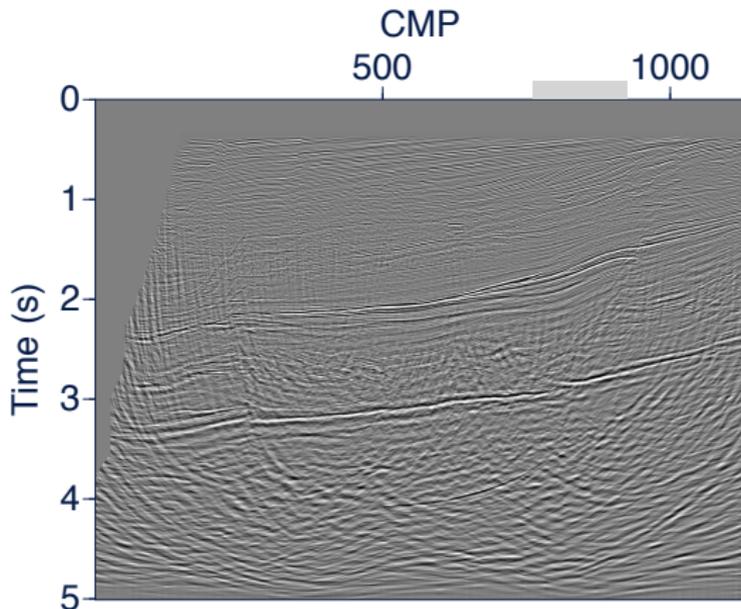
**Exemple – méthode
TZO**

Analyse de vitesse -
exemple

Annexe

Références

- Données migrée en temps, traitement isotrope (NMO, DMO, migration).



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

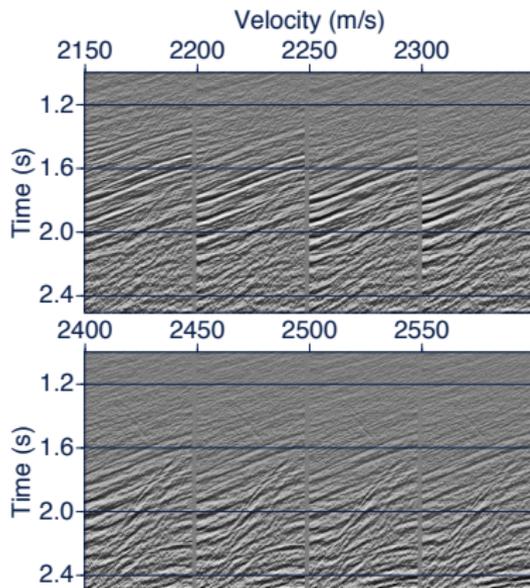
Exemple – méthode
TZO

Analyse de vitesse -
exemple

Annexe

Références

- Sections sommées à vitesses constantes après NMO & DMO isotropes;
- Réflecteurs sub-horizontaux : OK pour $v \approx 2200$ m/s;
- Réflecteurs inclinés : OK pour $v \approx 2400$ m/s;



Exemple – méthode TZO

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

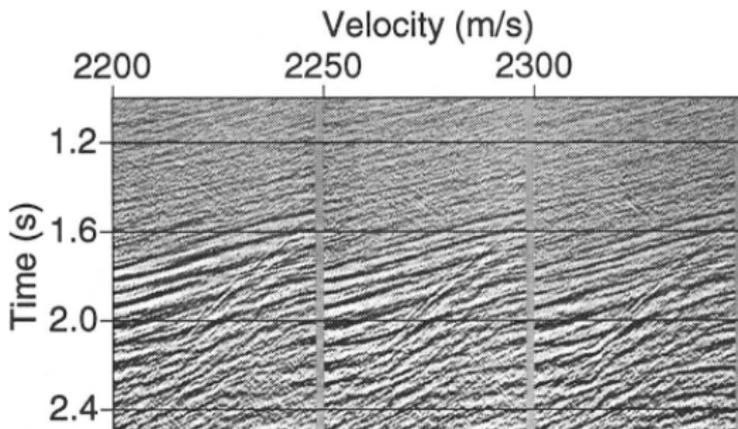
Exemple – méthode
TZO

Analyse de vitesse -
exemple

Annexe

Références

- Estimation 1 – modèle homogène
- Une valeur de η effectif de 0.07 est obtenue ;
- Sections sommées à vitesses constantes après NMO & DMO *anisotropes*.



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

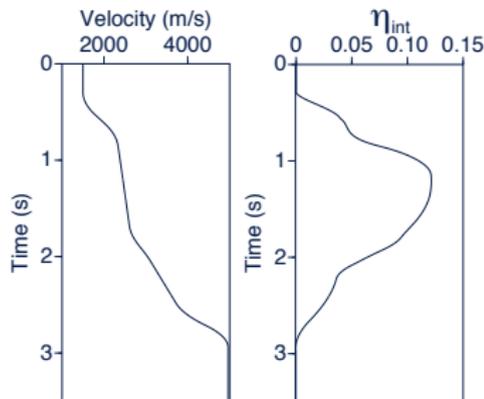
Exemple – méthode
TZO

Analyse de vitesse -
exemple

Annexe

Références

- Estimation 2 – modèle hétérogène selon z
- $V_{\text{nmo}}(0)$ et η obtenus à partir de la vitesse NMO du réflecteur incliné, évaluée en 5 points sur la faille;
- Région au dessus de 2 s (η atteignant 0.12) correspond à une formation de shale.



Exemple – méthode TZO

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

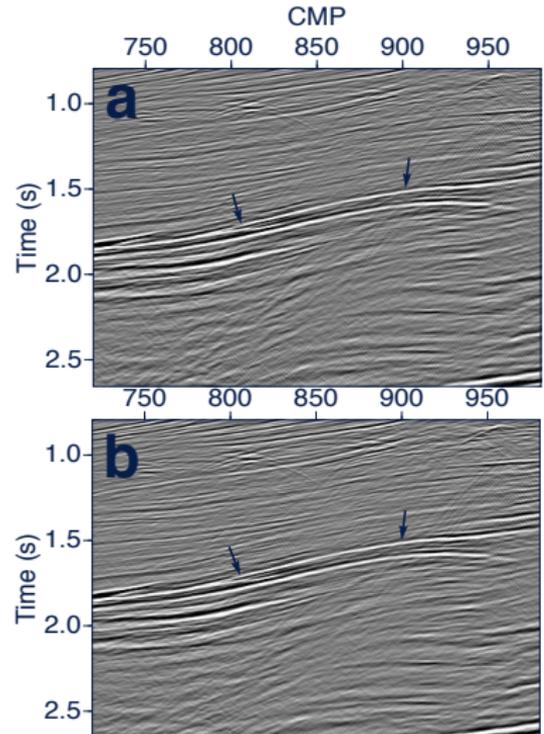
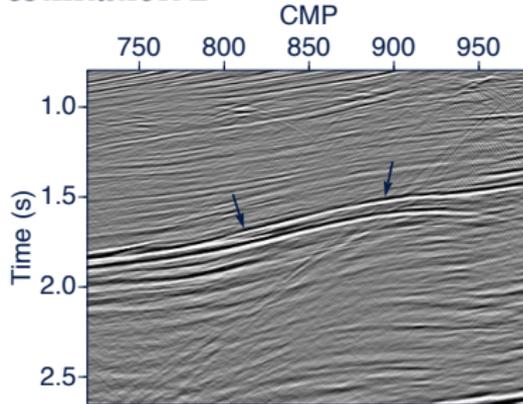
Exemple – méthode
TZO

Analyse de vitesse -
exemple

Annexe

Références

→ section déport nul avec
NMO et (a) DMO isotrope
vitesse constante, et (b) DMO
isotrope $v(z)$
↓ (c) section déport nul après
NMO + DMO anisotrope avec
estimation 2



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

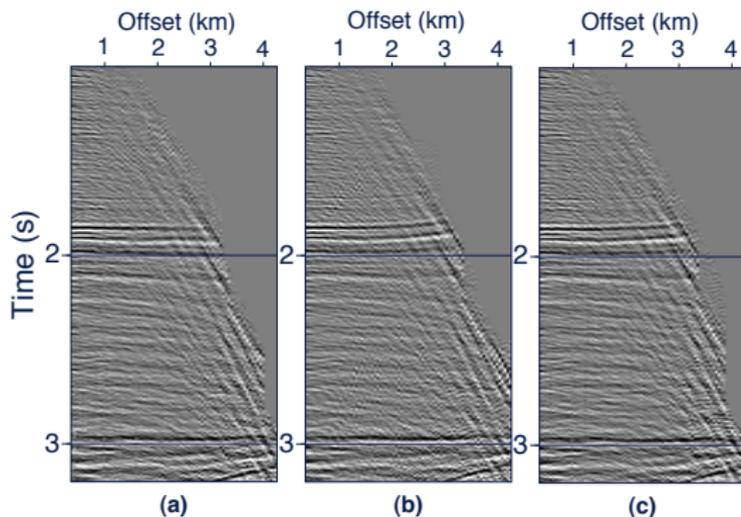
**Exemple – méthode
TZO**

Analyse de vitesse -
exemple

Annexe

Références

- CMP après (a) TZO anisotrope, (b) NMO et DMO isotrope, (c) NMO et DMO $v(z)$ isotrope



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

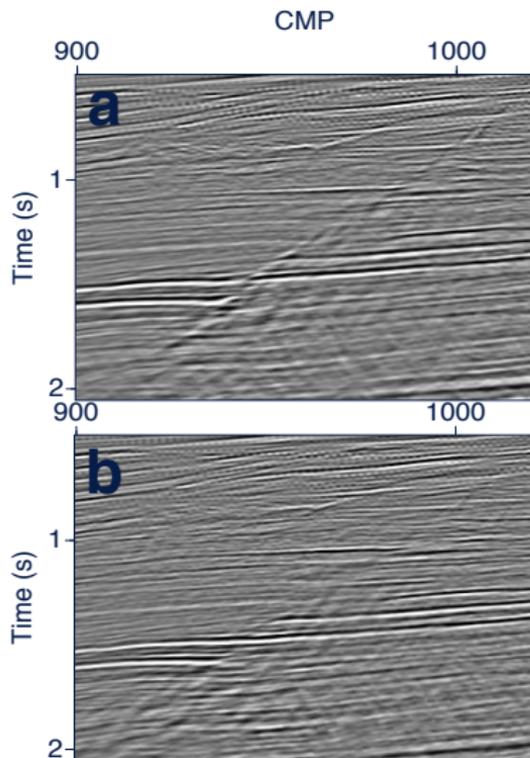
**Exemple – méthode
TZO**

Analyse de vitesse -
exemple

Annexe

Références

- (a) migration anisotrope des données (a) de la page précédente
- (b) migration isotrope des données (b) de la page précédente



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbe
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

Exemple - méthode
TZO

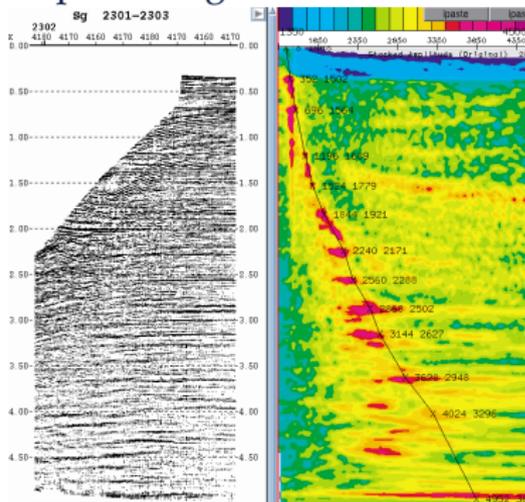
**Analyse de vitesse -
exemple**

Annexe

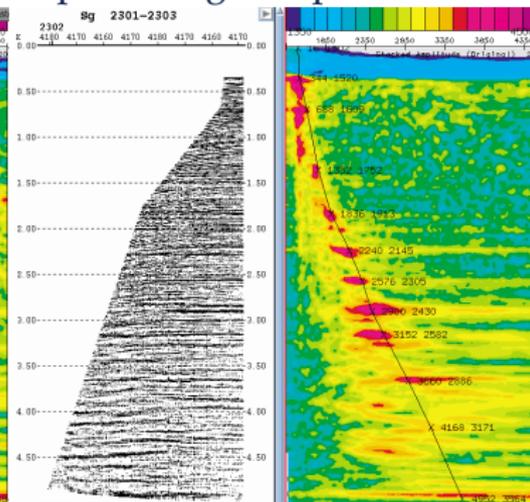
Références

CMP après correction NMO d'ordre 2

Dépôts longs inclus



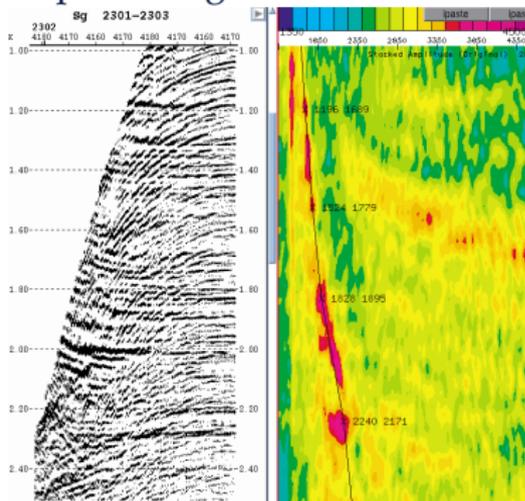
Dépôts longs coupés



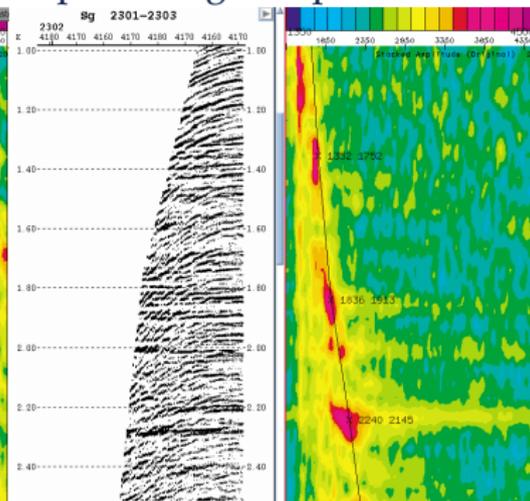
- Introduction
- Théorie de base
- Anisotropie et AVO
- Anisotropie et NMO
- Courbe
d'indicatrice non
hyperbolique
- Estimation de
l'anisotropie
- Méthode TZO
- Exemple - méthode
TZO
- Analyse de vitesse -
exemple**
- Annexe
- Références

Zoom sur CMP après correction NMO d'ordre 2

Dépôts longs inclus



Dépôts longs coupés



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

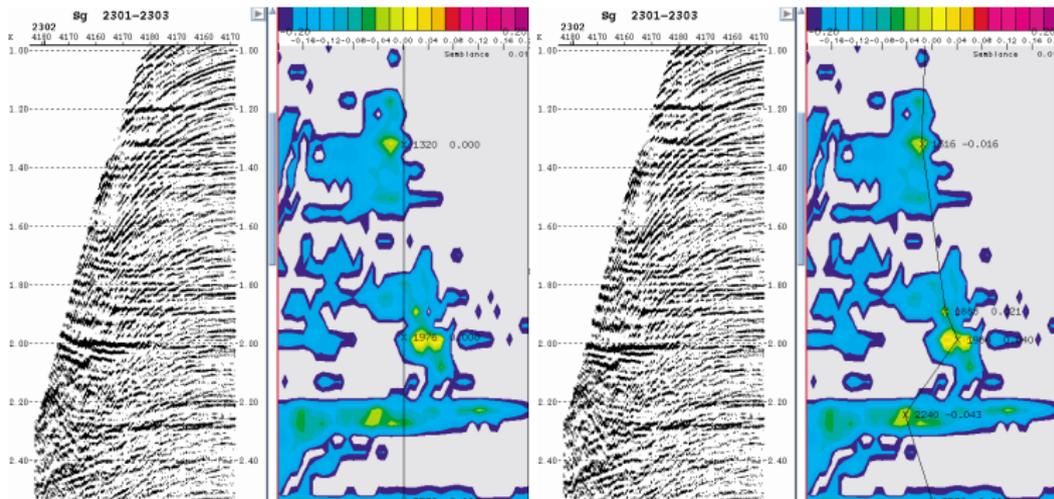
Exemple - méthode
TZO

**Analyse de vitesse -
exemple**

Annexe

Références

Spectre du paramètre η



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

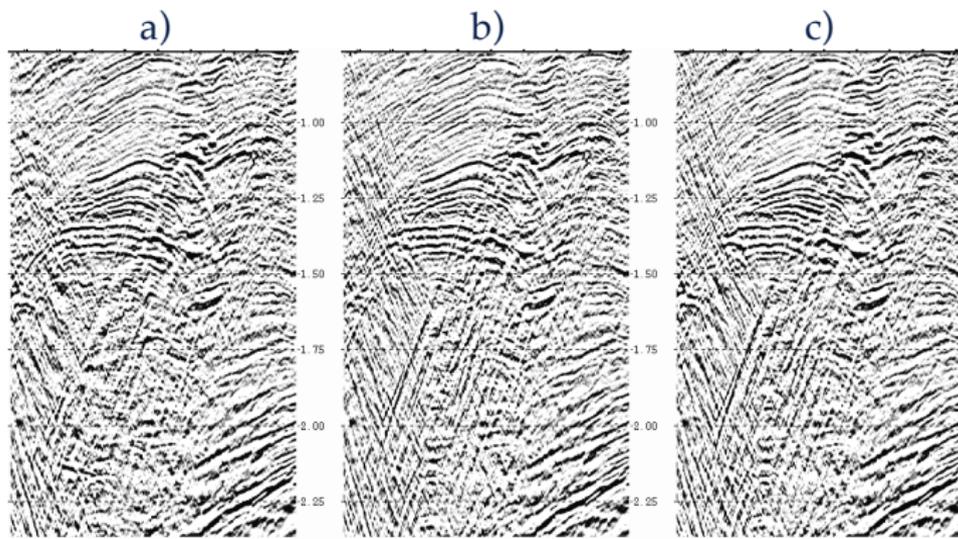
Exemple - méthode
TZO

**Analyse de vitesse -
exemple**

Annexe

Références

Portion non migrée



- a) isotrope, avec déports longs
- b) isotrope, sans déports longs
- c) anisotrope, avec déports longs

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

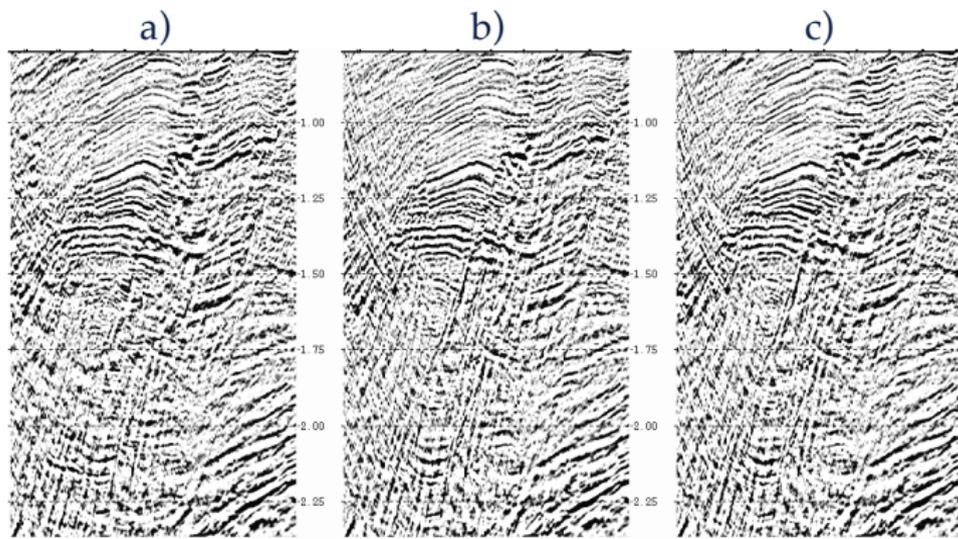
Exemple - méthode
TZO

**Analyse de vitesse -
exemple**

Annexe

Références

Portion migrée après sommation



- a) isotrope, avec déports longs
- b) isotrope, sans déports longs
- c) anisotrope, avec déports longs

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

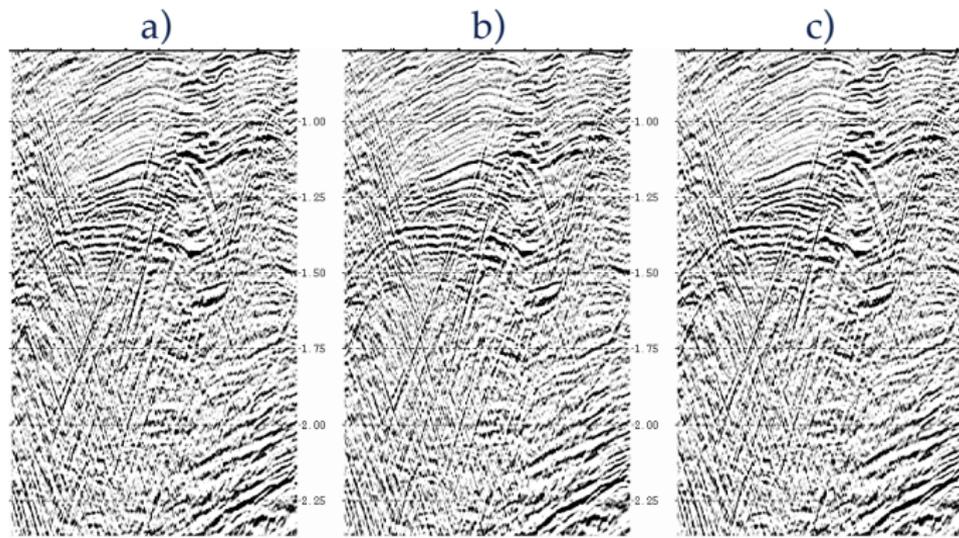
Exemple - méthode
TZO

**Analyse de vitesse -
exemple**

Annexe

Références

Portion avec DMO non migrée



- a) isotrope, avec déports longs
- b) isotrope, sans déports longs
- c) anisotrope, avec déports longs

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Méthode TZO

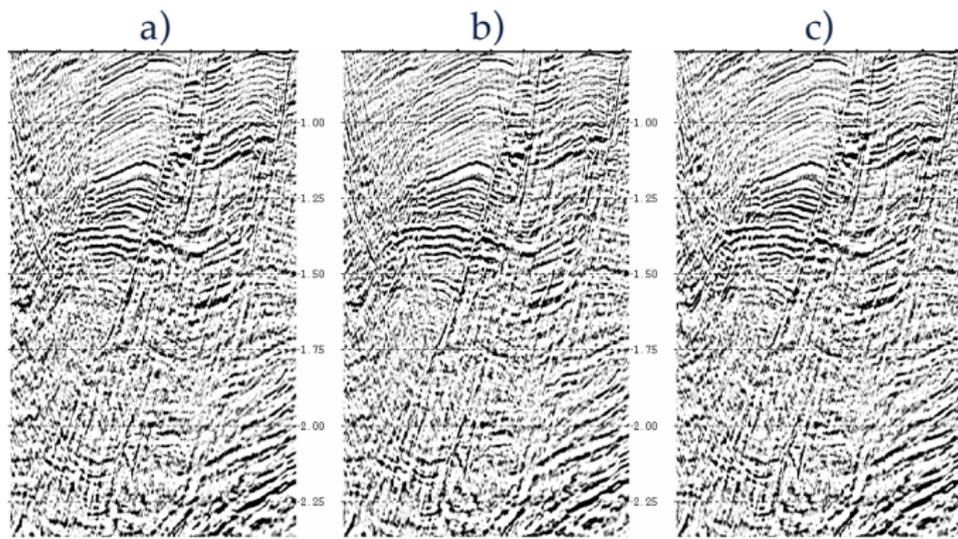
Exemple - méthode
TZO

**Analyse de vitesse -
exemple**

Annexe

Références

Portion avec DMO migrée après sommation



- a) isotrope, avec déports longs
- b) isotrope, sans déports longs
- c) anisotrope, avec déports longs

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

Annexe

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- La transformée $\tau-p$ permet de décomposer le champ acoustique en composantes d'onde plane;
- Cette transformation se fait par un changement de coordonnée linéaire pour la dimension temporelle, et en sommant selon l'axe des déports (*slant stacking* en anglais);
- On peut alors visualiser les données en fonction du paramètre du rai p ;
 - Chaque trace dans un regroupement $\tau-p$ correspond à une onde plane se propageant à un angle donné par rapport à la verticale.
- Le domaine $\tau-p$ peut être avantageux pour plusieurs traitements tels que :
 - migration;
 - analyse de vitesse;
 - interpolation des traces;
 - suppression des multiples.
- Hypothèse : le milieu est 1D

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

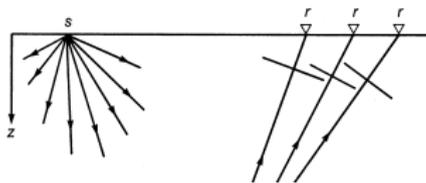
Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

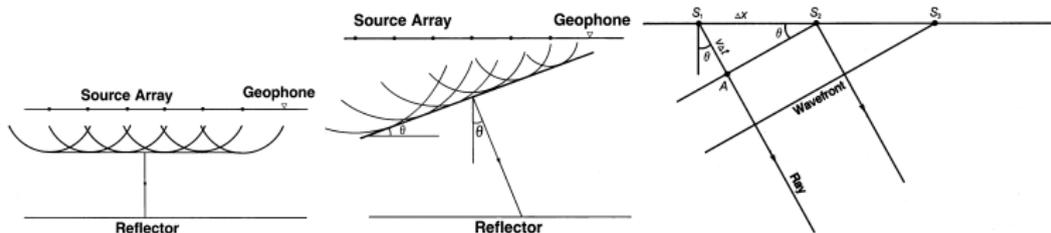
Annexe

Références



- Plusieurs tirs alignés simultanés créent une onde plane horizontale;
- Plusieurs tirs déphasés créent une onde plane inclinée;
- L'inclinaison θ est fonction de la vitesse de phase v , de la distance entre les sources Δx et du délai entre les tirs Δt

$$\sin \theta = \frac{v \Delta t}{\Delta x}. \quad (62)$$



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

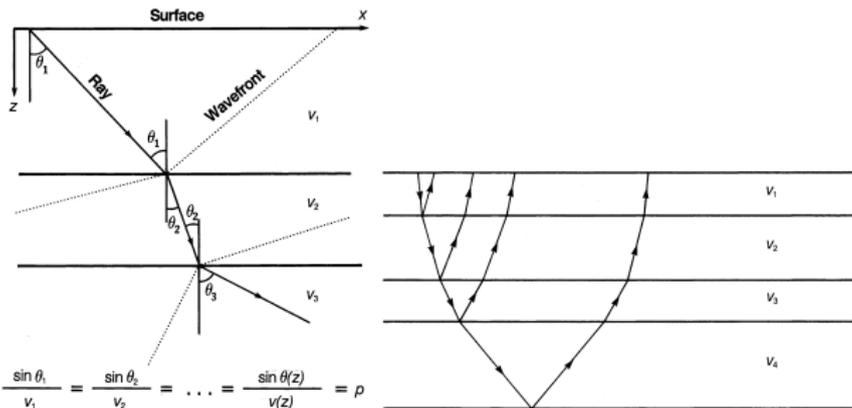
Annexe

Références

- La loi de Snell stipule que la quantité $\sin \theta/v$ est constante le long d'un rai, et égale à p le paramètre du rai ;
- Nous avons ainsi que

$$\Delta t = p\Delta x. \quad (63)$$

- Connaissant p et $v(z)$, il est possible de tracer la trajectoire.



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- La transformée τ - p se fait en deux étapes :
 - une correction LMO (*linear moveout*) est appliquée par

$$\tau = t - px, \quad (64)$$

où x est le dépôt, t le temps double et τ l'intercepte à $p = 0$;

- les données sont ensuite sommées selon x

$$S(p, \tau) = \sum_x P(x, \tau + px), \quad (65)$$

où $S(p, \tau)$ représente une onde plane associée à p .

- L'opération est répétée pour plusieurs valeurs de p , de façon à construire une collection « somme oblique » (*slant-stack gather*, ou τ - p gather);
- Note : cette opération est réversible.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

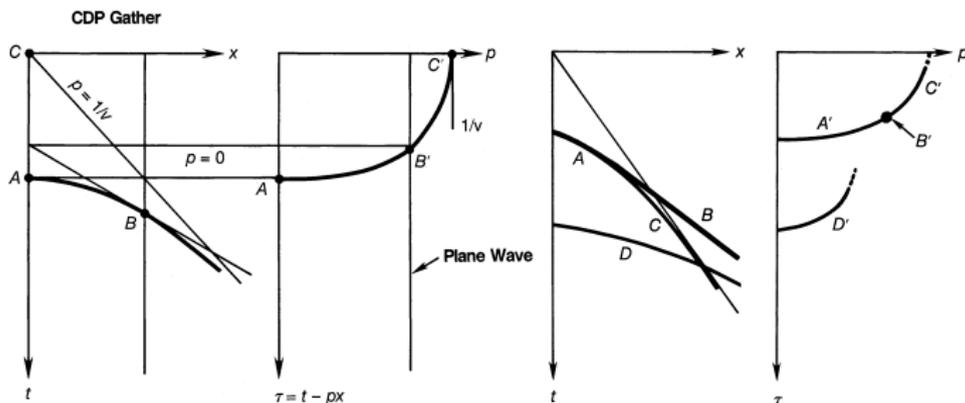
Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

$$\text{Illustration graphique de } S(p, \tau) = \sum_x P(x, \tau + px)$$



- Une hyperbole dans le domaine $t-x$ correspond à une ellipse dans le domaine $\tau-p$.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

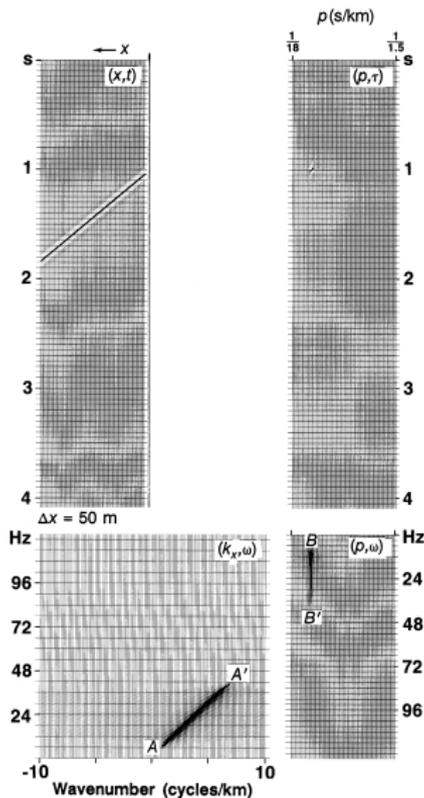
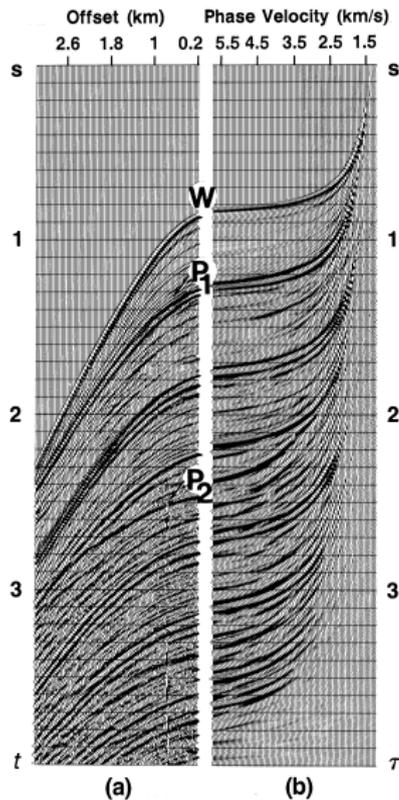
Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références



Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

Références

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Backus, G. E. (1962). Long-wave elastic anisotropy produced by horizontal layering. *Journal of Geophysical Research*, 67(11) :4427–4440.
- Carcione, J. M. (2007). *Wave Fields in Real Media : Wave Propagation in Anisotropic, Anelastic, Porous and Electromagnetic Media*, volume 38 of *Handbook of Geophysical Exploration : Seismic Exploration*. Elsevier, 2nd edition.
- Cohen, J. K. (1998). A convenient expression for the nmo velocity function in terms of ray parameter. *Geophysics*, 63(1) :275–278.
- Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J. (2009). *The Rock Physics Handbook*. Cambridge University Press, 2nd edition.
- Rüger, A. (2001). *Reflection Coefficients and Azimuthal AVO Analysis in Anisotropic Media*. Number 10 in Geophysical Monograph. SEG.

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure
d'indicatrice non
hyperbolique

Estimation de
l'anisotropie

Annexe

Références

- Thomsen, L. (1986). Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, 51(10) :1954–1966.
- Tsvankin, I. and Thomsen, L. (1994). Nonhyperbolic reflection moveout in anisotropic media. *Geophysics*, 59(8) :1290–1304.
- Tsvankin, I. (2005). *Seismic Signatures and Analysis of Reflection Data in Anisotropic Media*, volume 29 of *Handbook of Geophysical Exploration : Seismic Exploration*. Elsevier.
- Yilmaz, O. (2001). *Seismic data Analysis*. Number 10 in *Investigations in Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.