

Introduction  
Théorie de base  
Anisotropie et AVO  
Anisotropie et NMO  
Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique  
Estimation de  
l'anisotropie  
Annexe  
Références

# 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

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

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

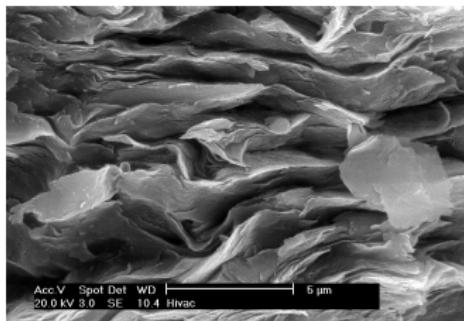
Anisotropie et NMO

Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

Références



# Introduction

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

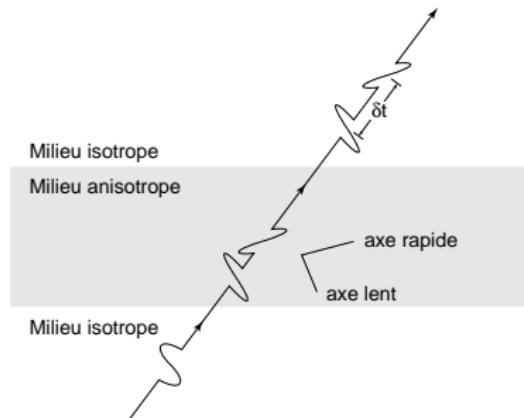
Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

Références

- L'anisotropie 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 déports longs ;
  - l'utilisation accrue des ondes S et de la biréfringence ;



# Introduction

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

# Équation 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

- 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;
- $\tau_{ij}$  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

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

# Équation 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

- 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.

# Vitesse de phase et 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

- Solution pour une onde plane ( $f = 0$ ) 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  $\mathbf{p} = \mathbf{n}/V$ ;
- $\omega$  est la fréquence angulaire.
- Le vecteur de polarisation est donné par l'équation de Christoffel

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

# Vitesse de phase et 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

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

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

- L'équation de Christoffel décrit un système à 3 valeurs propres pour  $\rho V^2$ , soit

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

où  $x = \rho V^2$  et

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

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

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

# Vitesse de phase et 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

- 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

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

# Vitesse de phase et 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

- 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 reliée au front d'onde.

# Vitesse de phase et 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

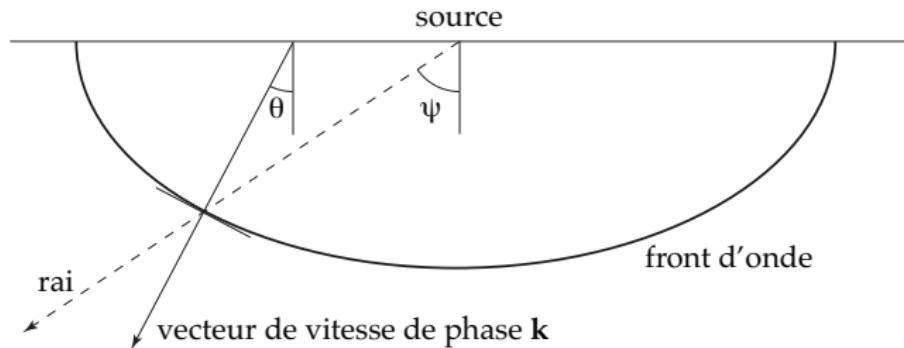
Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

Références

- Le vecteur de la vitesse de groupe ( $\mathbf{V}_G$ ) 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;
- $\theta$  est l'angle du vecteur de lenteur  $\mathbf{p}$  par rapport à la verticale;
- $\psi$  est l'angle du rai sismique par rapport à la verticale.

# Vitesse de phase et 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

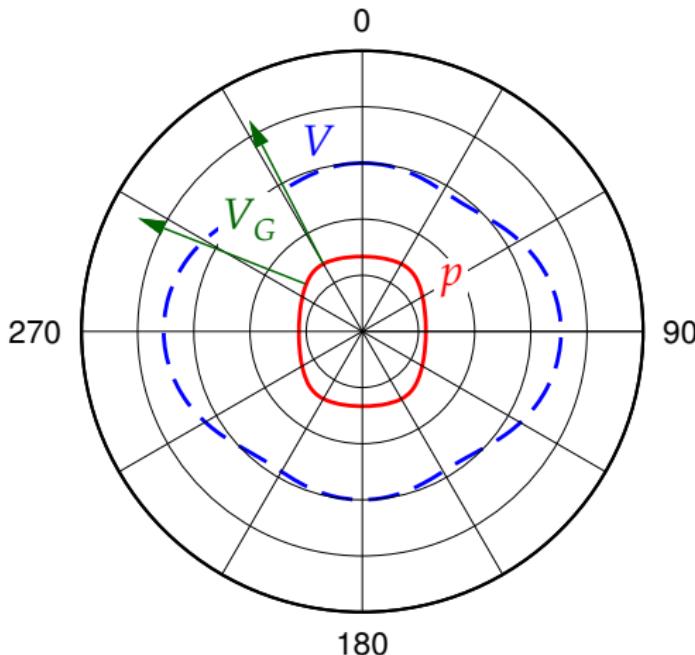
Anisotropie et NMO

Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

Références



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

# Vitesse de phase et 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.

# Milieux tricliniques

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

- 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.

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

# Milieux monocliniques

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

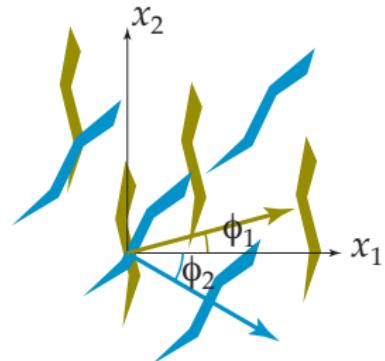
Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

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



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

# Milieux orthorombiques

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

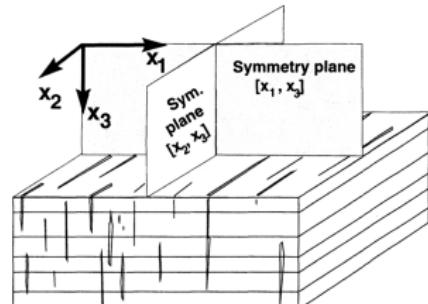
Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

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



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

# Isotropie transverse

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

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

# Isotropie transverse

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

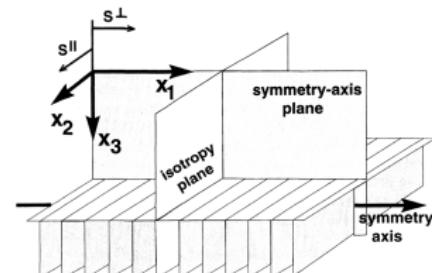
Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

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



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

# Milieu isotrope

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  $\lambda$  et  $\mu$ , et le tenseur vaut

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

# Paramètres de Thomsen

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

- 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 :

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

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

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

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

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

# Paramètres de Thomsen

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 un milieu isotrope,  $\epsilon$ ,  $\delta$  et  $\gamma$  valent zéro.
  - Ces paramètres peuvent donc servir à quantifier le degré d'anisotropie.
- Le paramètre  $\epsilon$  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  $\gamma$  donne la même mesure pour l'onde  $SH$ ;
- Le paramètre  $\delta$  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*).

# Paramètres de Thomsen

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  $\epsilon$  et  $\gamma$  sont généralement positifs;
- Dans les bassins sédimentaires,  $\epsilon$  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  $\delta$  (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.

# Paramètres de Thomsen

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

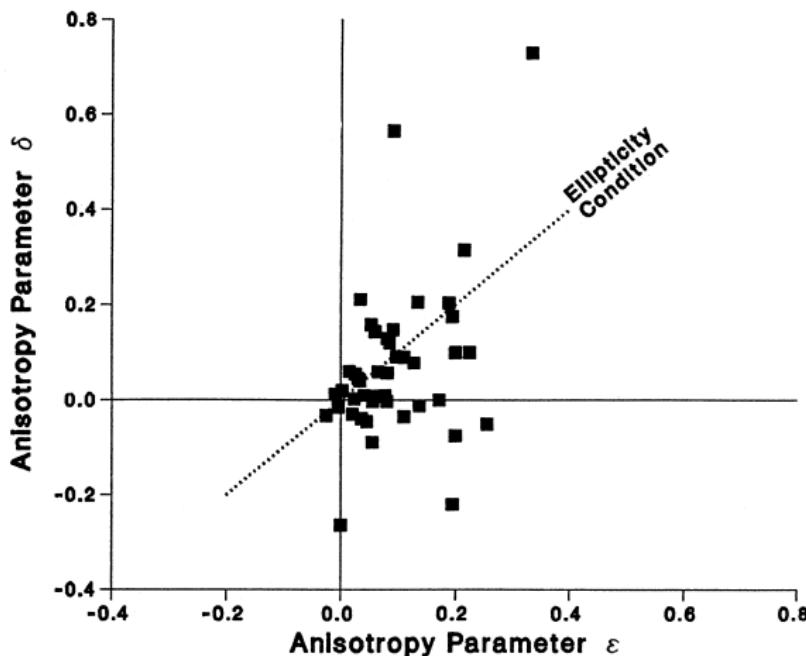
Anisotropie et NMO

Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

Références



# VTI – vitesse de phase et 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

- 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

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

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

# VTI – vitesse de phase et 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

- 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

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

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

# VTI – vitesse de phase et 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

- 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

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

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

# VTI – vitesse de phase et 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

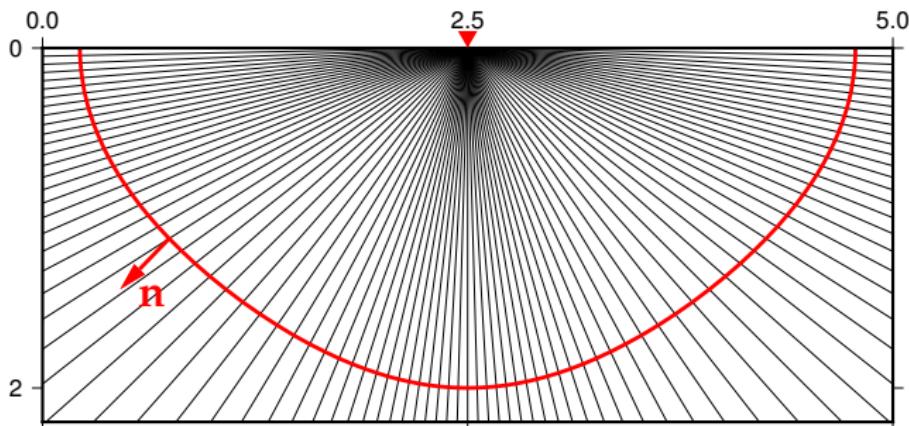
Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

Références

- 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  $\theta$ .

# VTI – vitesse de phase et 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

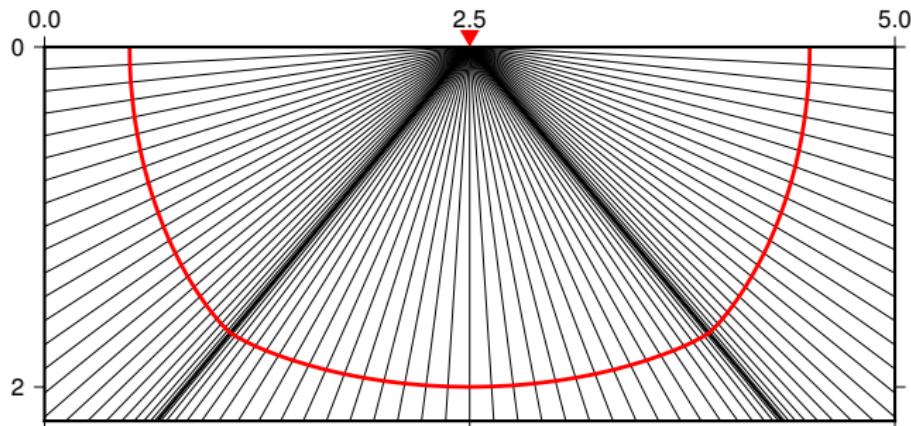
Courbure d'indicatrice non hyperbolique

Estimation de l'anisotropie

Annexe

Références

- 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  $\theta$ .

# VTI – vitesse de phase et 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

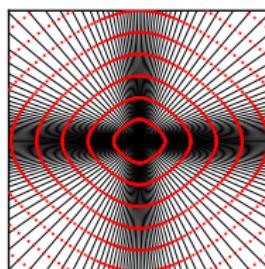
Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

Références

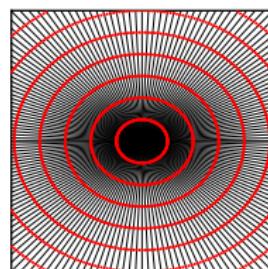
## Ondes $P$ – Rais et fronts d'onde en milieux VTI

Green River Shale



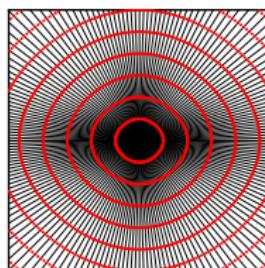
$$\epsilon = 0.195, \delta = -0.22$$

Mesa Clay Shale



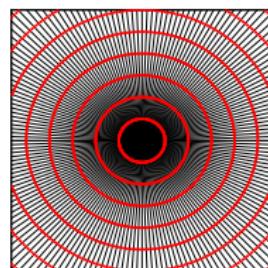
$$\epsilon = 0.189, \delta = 0.204$$

Taylor Sand



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

Mesa Shale



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

# VTI – vitesse de phase et 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

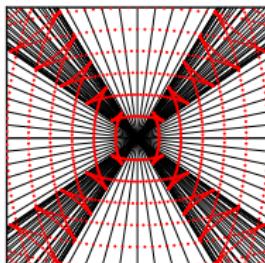
Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

Références

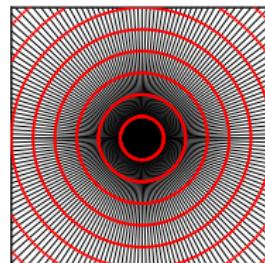
## Ondes SV – Rais et fronts d'onde en milieux VTI

Green River Shale



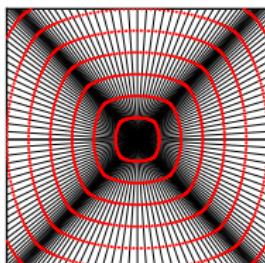
$$\varepsilon = 0.195, \delta = -0.22 \\ \sigma = 1.470$$

Mesa Clay Shale



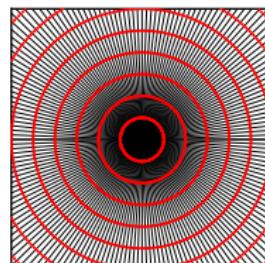
$$\varepsilon = 0.189, \delta = 0.204 \\ \sigma = -0.050$$

Taylor Sand



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

Mesa Shale



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

# VTI – vitesse de phase et 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

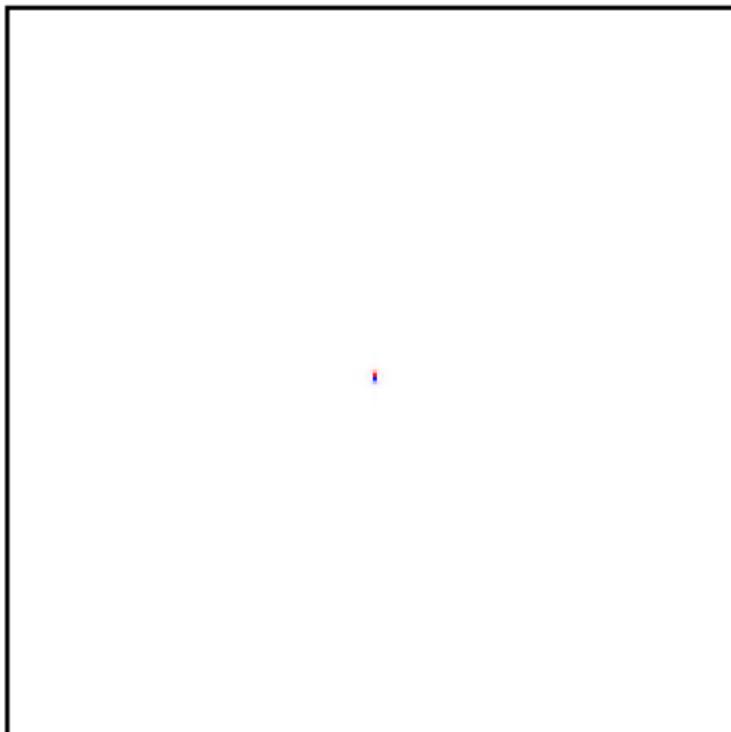
Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

Références

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



# VTI – vitesse de phase et 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

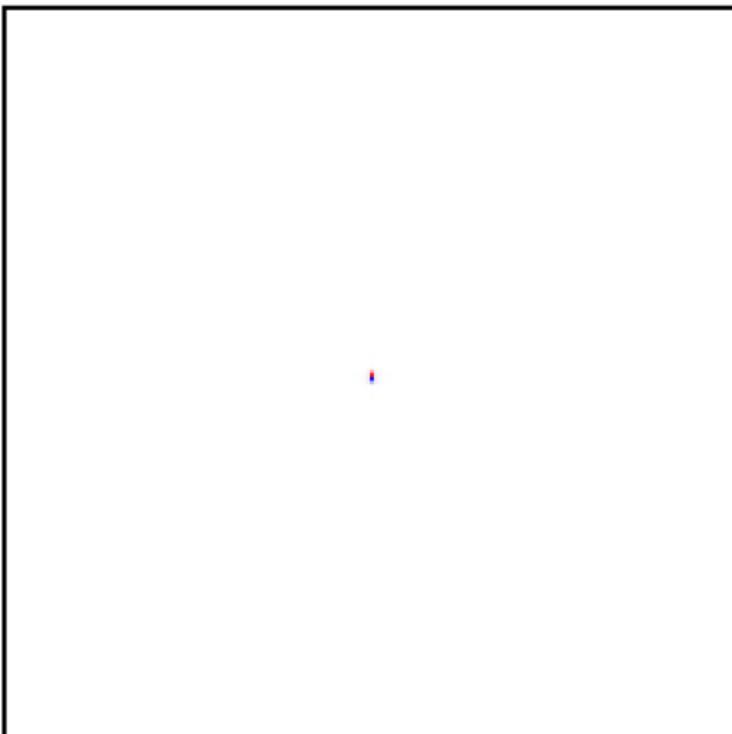
Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

Références

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



# Méthode de Backus

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 (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.

# Méthode de Backus

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

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

# Méthode de Backus

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 :

$$\begin{aligned} \bullet \quad A &= \left\langle \frac{4\mu(\lambda+\mu)}{\lambda+2\mu} \right\rangle + \left\langle \frac{1}{\lambda+2\mu} \right\rangle^{-1} \left\langle \frac{\lambda}{\lambda+2\mu} \right\rangle^2; \\ \bullet \quad B &= \left\langle \frac{2\mu\lambda}{\lambda+2\mu} \right\rangle + \left\langle \frac{1}{\lambda+2\mu} \right\rangle^{-1} \left\langle \frac{\lambda}{\lambda+2\mu} \right\rangle^2; \\ \bullet \quad C &= \left\langle \frac{1}{\lambda+2\mu} \right\rangle^{-1}; \\ \bullet \quad F &= \left\langle \frac{1}{\lambda+2\mu} \right\rangle^{-1} \left\langle \frac{\lambda}{\lambda+2\mu} \right\rangle; \\ \bullet \quad D &= \left\langle \frac{1}{\mu} \right\rangle^{-1}; \\ \bullet \quad M &= \langle \mu \rangle. \end{aligned}$$

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

# Généralités

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 fonction 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.

# 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

- 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)

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

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

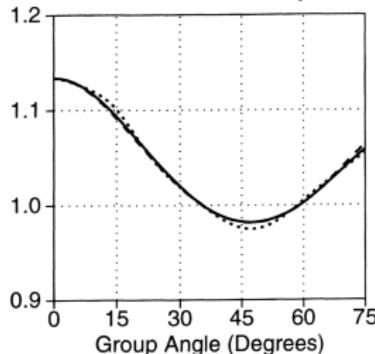
Annexe

Références

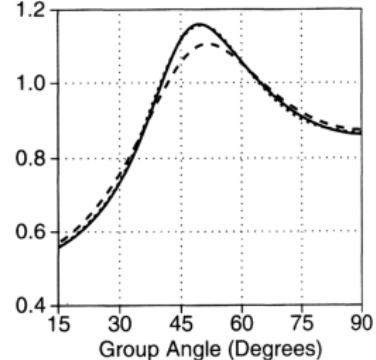
- $V_{P0}=8328 \text{ m/s}$ ,  $V_{S0}=4606 \text{ m/s}$ ,  $\epsilon=-0.008$ ,  $\delta=-0.059$ ,  $\sigma=0.168$ .

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

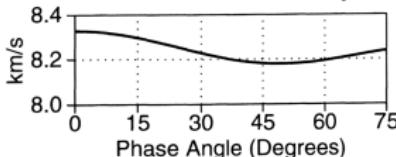
Normalized P-Wave Amplitude



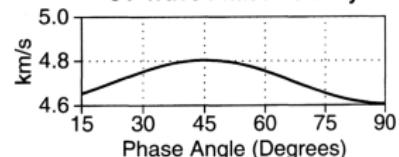
Normalized SV-Wave Amplitude



P-Wave Phase Velocity



SV-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

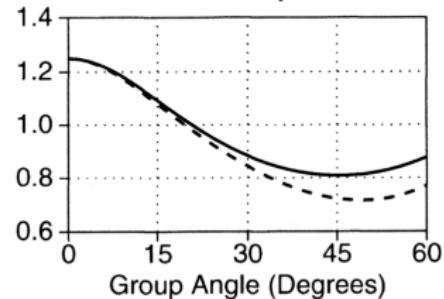
Annexe

Références

$$\varepsilon - \delta = 0.2$$

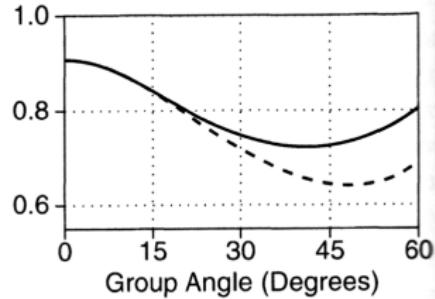
$$\varepsilon = 0.1 \quad \delta = -0.1$$

P-Wave Amplitude

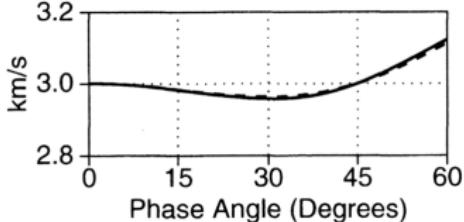


$$\varepsilon = 0.25 \quad \delta = 0.05$$

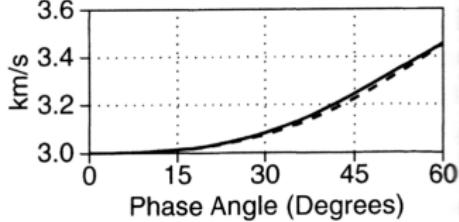
P-Wave Amplitude



P-Wave Phase Velocity



P-Wave Phase Velocity



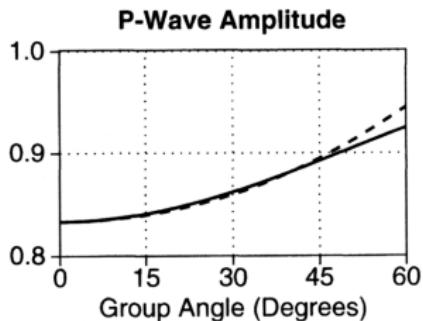
courbes normalisées p/r amplitude réfléchie pour milieu isotrope

# Amplitude au champ lointain

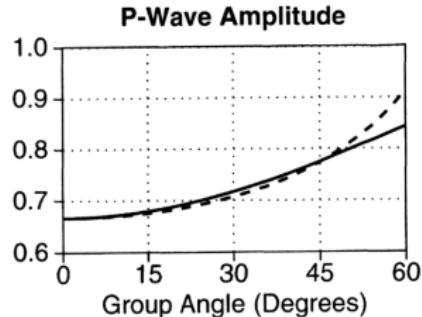
- Introduction
- Théorie de base
- Anisotropie et AVO
- Amplitude au champ lointain
- Coefficient de réflexion
- Anisotropie et NMO
- Courbure d'indicatrice non hyperbolique
- Estimation de l'anisotropie
- Annexe
- Références

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

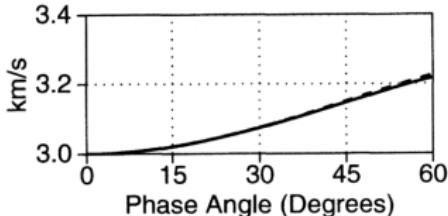
$\epsilon = \delta = 0.1$



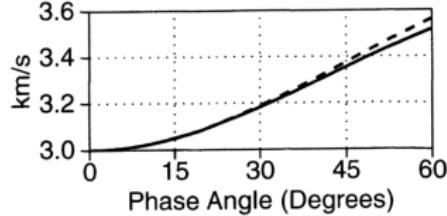
$\epsilon = \delta = 0.25$



**P-Wave Phase Velocity**



**P-Wave Phase Velocity**

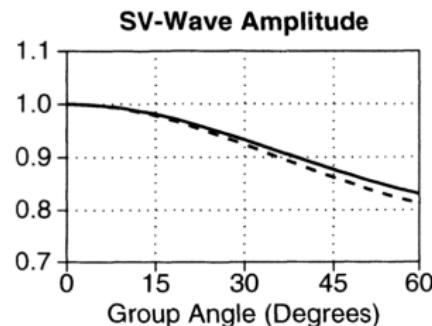


courbes normalisées p/r amplitude réfléchie pour milieu isotrope

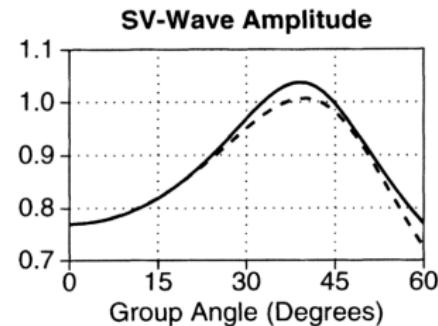
# Amplitude au champ lointain

- 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

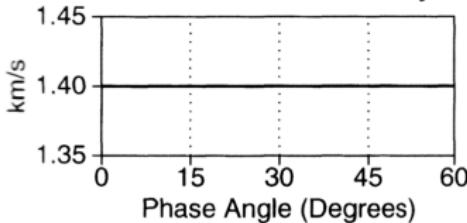
$\sigma=0$  ( $\varepsilon=\delta=0.2$ )



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

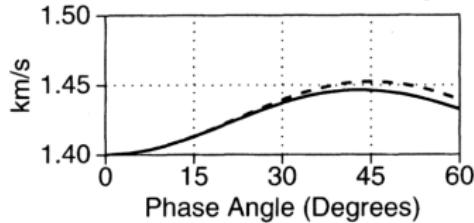


**SV-Wave Phase Velocity**



a

**SV-Wave Phase Velocity**



b

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

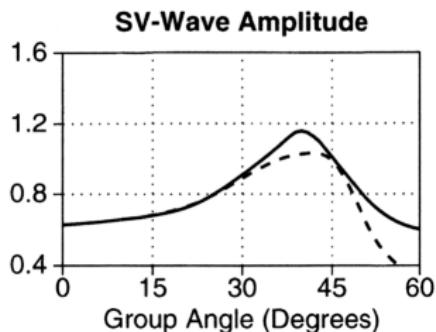
Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

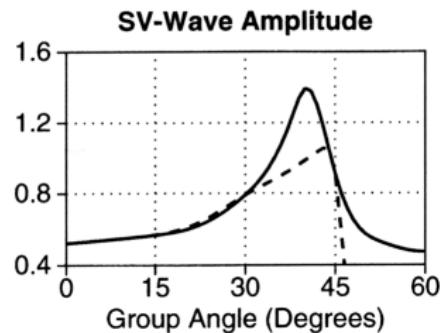
Annexe

Références

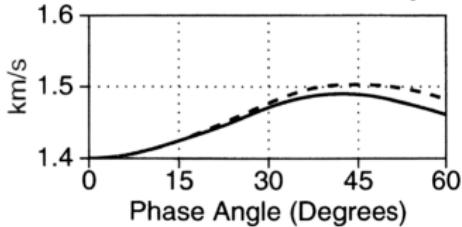
$$\sigma=0.3 \quad (\epsilon=0.15, \delta=0.05)$$



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

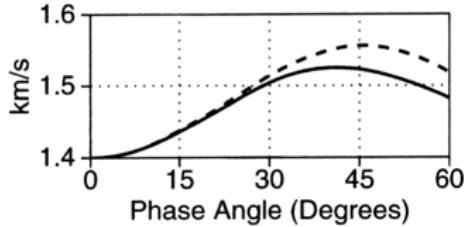


$$\text{SV-Wave Phase Velocity}$$



a

$$\text{SV-Wave Phase Velocity}$$



b

courbes normalisées p/r amplitude réfléchie pour milieu isotrope

# Coefficient 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

- 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

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

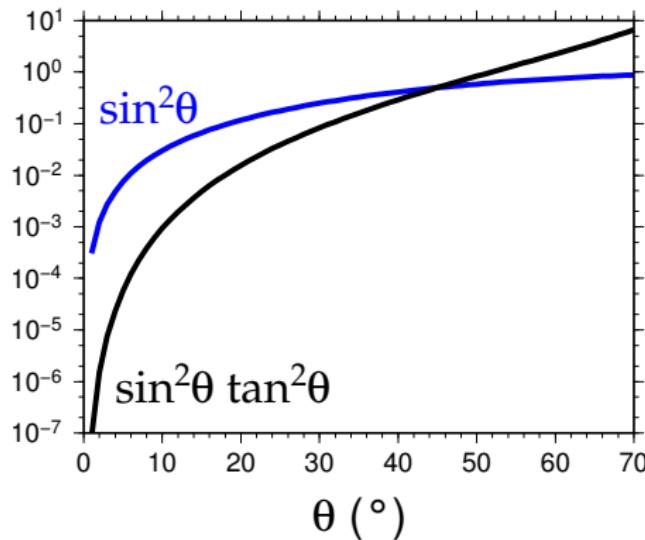
(les indices 1 et 2 réfèrent aux couches supérieure et inférieure respectivement)

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

# Coefficient 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

- Le paramètre  $\delta$  a une influence prépondérante au déports courts;



# Coefficient de réflexion

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Amplitude au champ  
lointain

Coefficient de réflexion

Anisotropie et NMO

Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

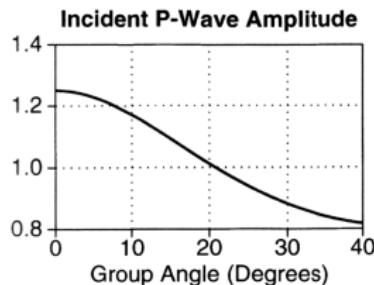
Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

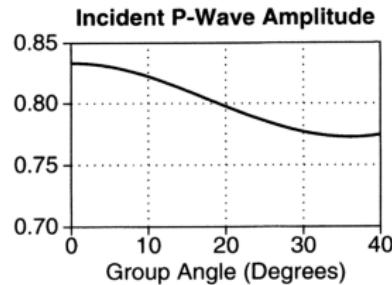
Références

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

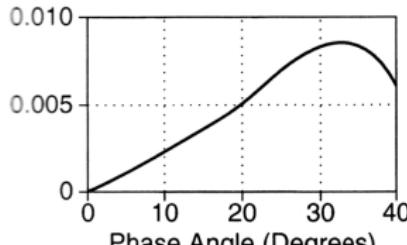
$$\epsilon=0.1 \quad \delta=-0.1$$



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

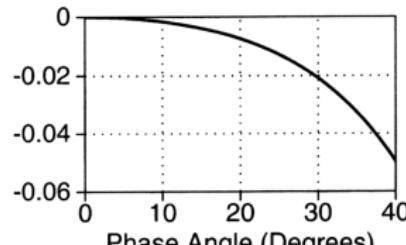


Reflection Coefficient



a

Reflection Coefficient



b

# Gradient 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

- 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 tous 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

# Généralités

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 déport  $x$  pour des données en CMP est communément approximé par une expansion en série de Taylor

$$t^2 = A_0 + A_2 x^2 + A_4 x^4 + \dots, \quad (37)$$

où les coefficients sont

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

$t_0$  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

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

# Généralités

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.

# 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

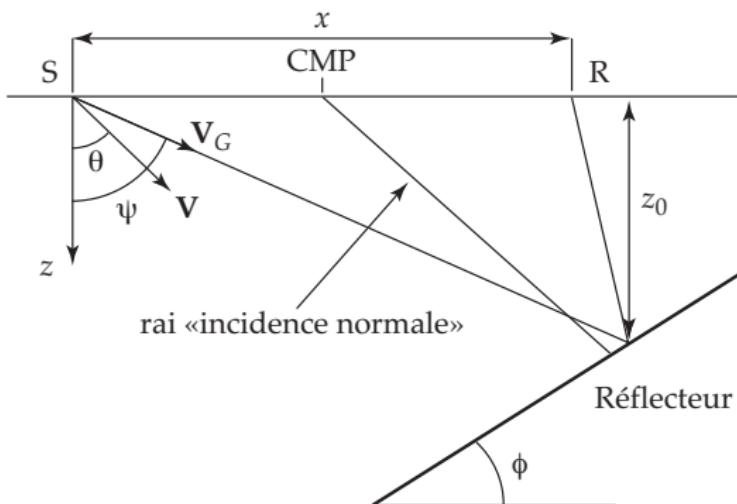
Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

Références

- Tsvankin a montré que

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



# 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).

# 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

- 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.

# Erreur DMO

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Équations NMO 2D

Paramétrisation  
alternative

Conversion  
temps-profondeur

Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

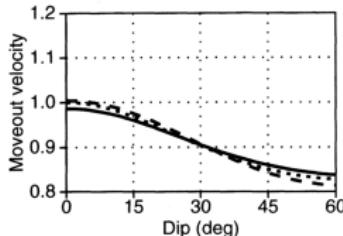
Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

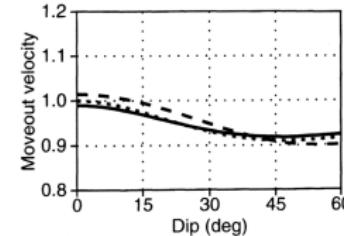
Références

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

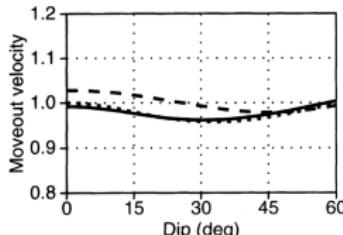
$$\epsilon=0 \quad \delta=0.1$$



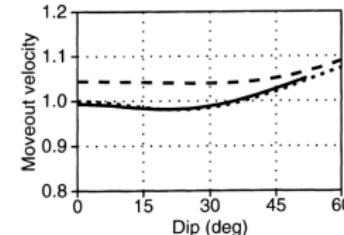
$$\epsilon=0.1 \quad \delta=0.2$$



$$\epsilon=0.2 \quad \delta=0.3$$



$$\epsilon=0.3 \quad \delta=0.4$$



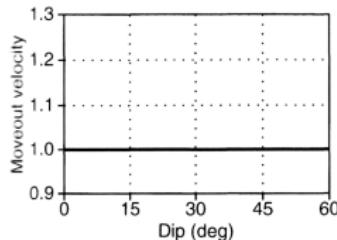
Trait plein : méthode  $t^2-x^2$ ,      pointillé : solution exacte,  
tireté : solution  $|\epsilon| \ll 1, |\delta| \ll 1$  (éq. (45))

# Erreur DMO

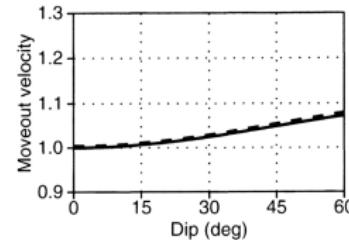
- Introduction
- Théorie de base
- Anisotropie et AVO
- Anisotropie et NMO
- Équations NMO 2D
- Paramétrisation alternative
- Conversion temps-profondeur
- Courbure d'indicatrice non hyperbolique
- Estimation de l'anisotropie
- Annexe
- Références

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

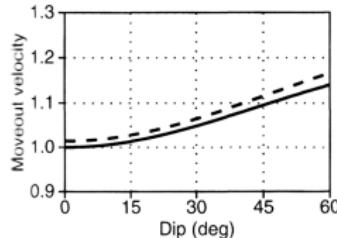
$\epsilon=0 \quad \delta=0$



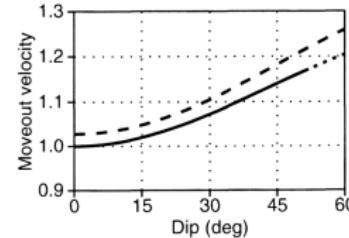
$\epsilon=0.1 \quad \delta=0.1$



$\epsilon=0.2 \quad \delta=0.2$



$\epsilon=0.3 \quad \delta=0.3$



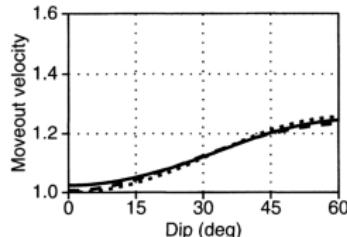
Trait plein : méthode  $t^2-x^2$ , pointillé : solution exacte, tireté : solution  $|\epsilon| \ll 1, |\delta| \ll 1$  (éq. (45))

# Erreur DMO

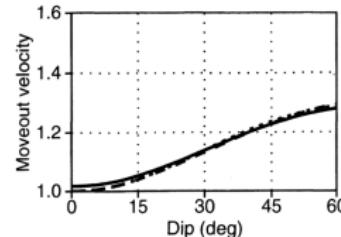
- Introduction
- Théorie de base
- Anisotropie et AVO
- Anisotropie et NMO
- Équations NMO 2D
- Paramétrisation alternative
- Conversion temps-profondeur
- Courbure d'indicatrice non hyperbolique
- Estimation de l'anisotropie
- Annexe
- Références

$$\varepsilon - \delta = 0.1$$

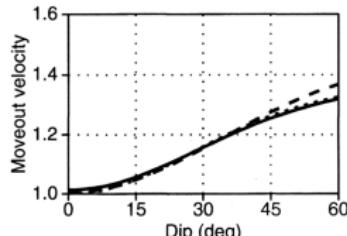
$$\varepsilon = 0 \quad \delta = -0.1$$



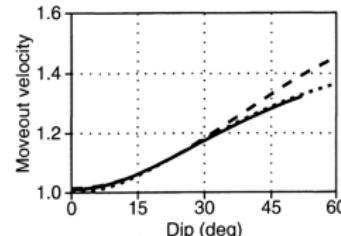
$$\varepsilon = 0.1 \quad \delta = 0$$



$$\varepsilon = 0.2 \quad \delta = 0.1$$



$$\varepsilon = 0.3 \quad \delta = 0.2$$



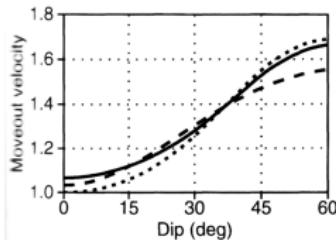
Trait plein : méthode  $t^2 - x^2$ ,      pointillé : solution exacte,  
tireté : solution  $|\varepsilon| \ll 1, |\delta| \ll 1$  (éq. (45))

# Erreur DMO

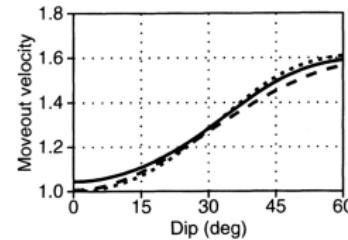
- Introduction
- Théorie de base
- Anisotropie et AVO
- Anisotropie et NMO
- Équations NMO 2D
- Paramétrisation alternative
- Conversion temps-profondeur
- Courbure d'indicatrice non hyperbolique
- Estimation de l'anisotropie
- Annexe
- Références

$\epsilon - \delta = 0.2$

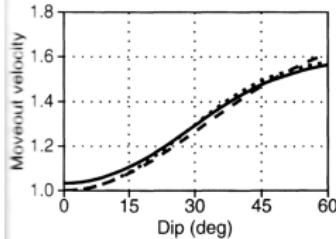
$\epsilon=0 \quad \delta=-0.2$



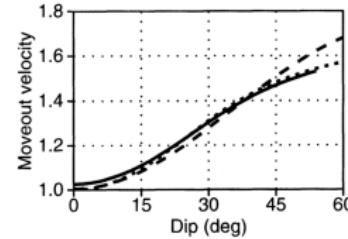
$\epsilon=0.1 \quad \delta=-0.1$



$\epsilon=0.2 \quad \delta=0$



$\epsilon=0.3 \quad \delta=0.1$



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

# Paramétrisation alternative

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)

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

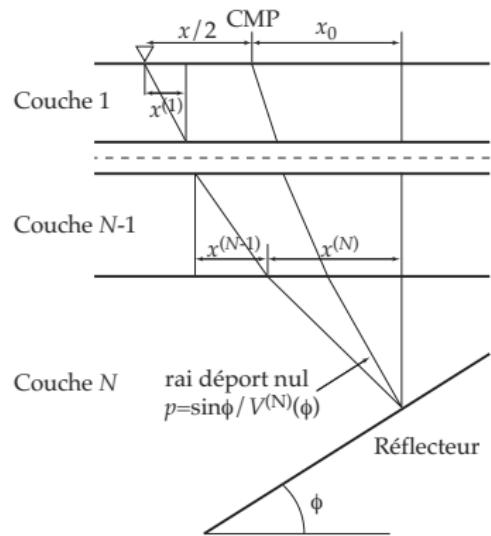
où  $q' \equiv dq/dp$  et  $q'' = d^2q/dp^2$ ;

- 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.

# Conversion temps-profondeur

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;



# Conversion temps-profondeur

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 départ 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.

# Conversion temps-profondeur

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

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

où  $V_{0,\text{rms}}^2$  est la moyenne RMS (pondérée par  $t_0^{(i)}$ ) de la vitesse verticale vraie et  $\xi$  est la moyenne du paramètre d'anisotropie de l'onde considérée

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

$\zeta$  étant  $\delta$  pour l'onde  $P$ ,  $\epsilon$  pour l'onde  $SV$  et  $\gamma$  pour l'onde  $SH$ .

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

# Motivation

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

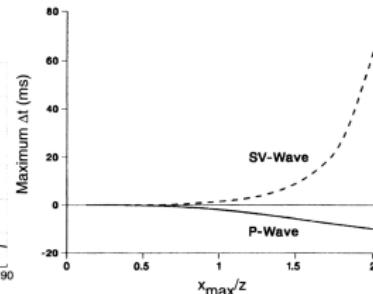
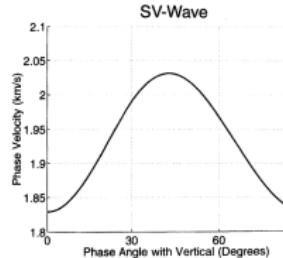
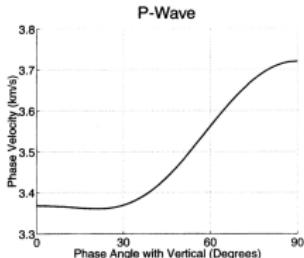
Onde P – milieu VTI

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

# Onde $P$ – milieu VTI

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

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

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

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

- $\eta$  est central pour le traitement de l'anisotropie en temps.

# Onde $P$ – milieu VTI

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

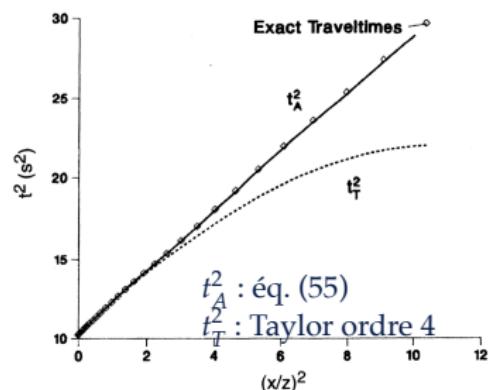
- Même en utilisant le terme d'ordre 4, l'erreur est non négligeable pour les longs départs;
- Une bonne approximation est donnée par Tsvankin and Thomsen (1994)

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

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

- En terme de  $\eta$ , 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

# Généralités

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 ( $V_{P0}$ ,  $V_{S0}$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ );
  - 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  $\eta$  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.

# Détermination du paramètre $\eta$

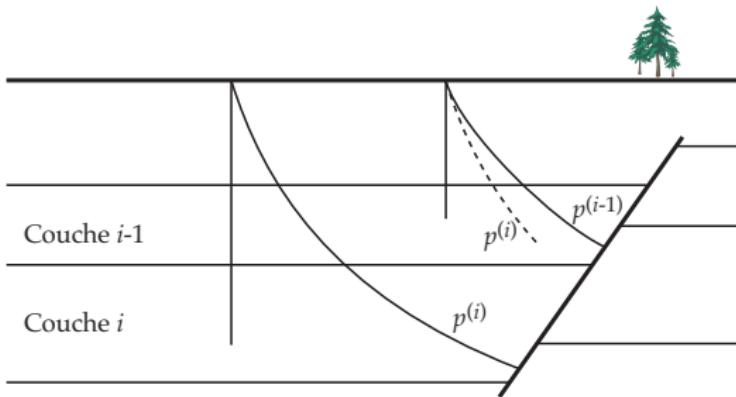
- Introduction
- Théorie de base
- Anisotropie et AVO
- Anisotropie et NMO
- Courbure d'indicatrice non hyperbolique
- Estimation de l'anisotropie
- Méthode TZO
- Exemple – méthode TZO
- Analyse de vitesse - exemple
- Annexe
- Références

- Il n'y a pas de procédure unique pour déterminer  $\eta$ ;
- 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).

# 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

- 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  $V_{\text{nmo}}(p = 0)$ .

# 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

- 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  $\xi$  a la signification de temps vertical (référentiel des mesures);

# 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

- 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 :  $V_{\text{nmo,int}}^2 = V_{P0,\text{int}}^2(1 + 2\delta_{\text{int}})$ ;
- 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.

# 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

- À partir de (59) et (60) et en utilisant (56), on peut ensuite trouver  $\eta_{\text{int}}$  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  $\eta_{\text{int}}$  par un polynôme pour stabiliser les calculs.

# Exemple – méthode TZO

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

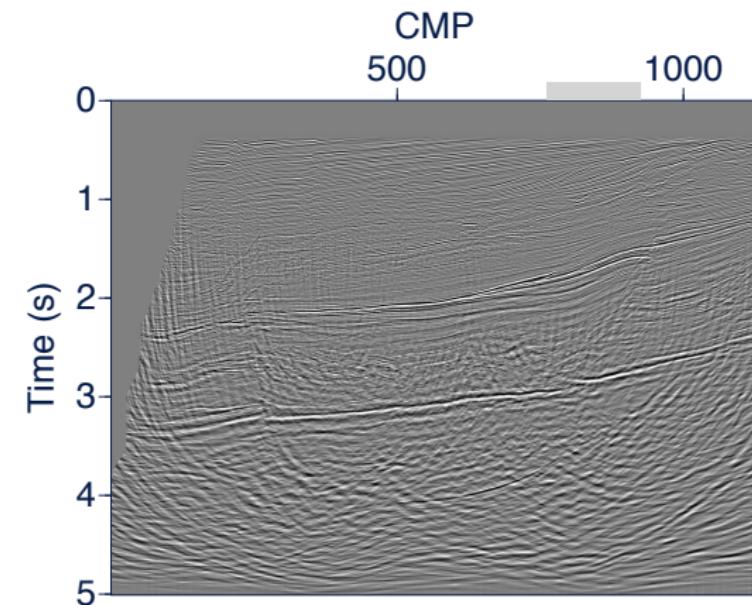
Méthode TZO

Exemple – méthode  
TZO

Analyse de vitesse -  
exemple

Annexe

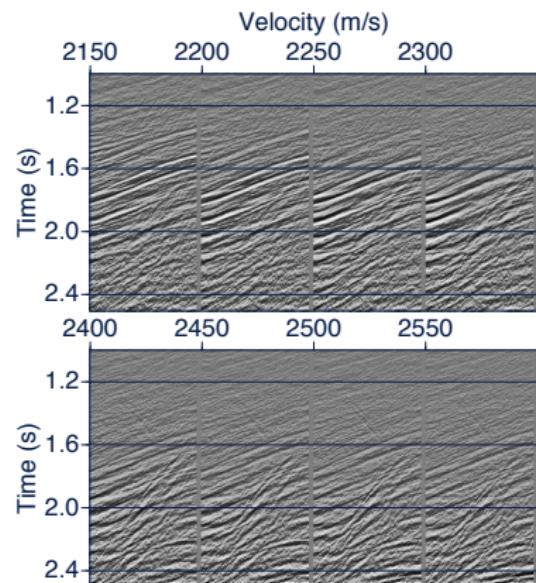
Références



# 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

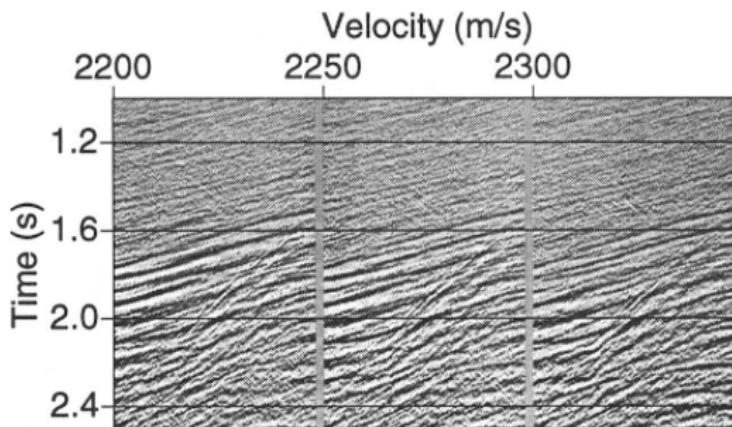
- Sections sommées à vitesses constantes après NMO & DMO isotropes;
- Réflecteurs sub-horizontaux : OK pour  $v \approx 2200 \text{ m/s}$ ;
- Réflecteurs inclinés : OK pour  $v \approx 2400 \text{ m/s}$ ;



# 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

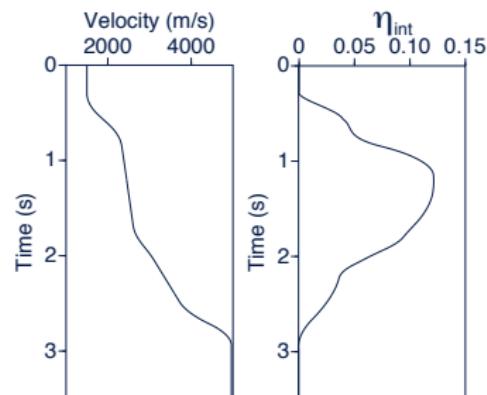
- Estimation 1 – modèle homogène
- Une valeur de  $\eta$  effectif de 0.07 est obtenue ;
- Sections sommées à vitesses constantes après NMO & DMO *anisotropes*.



# 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

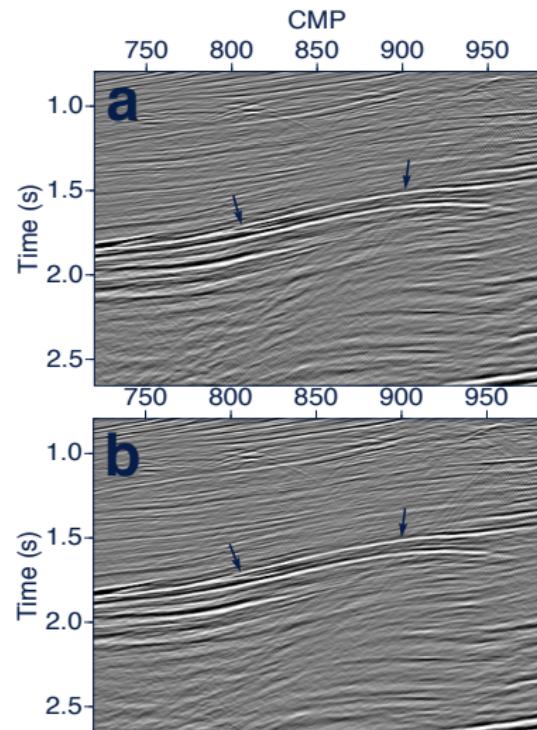
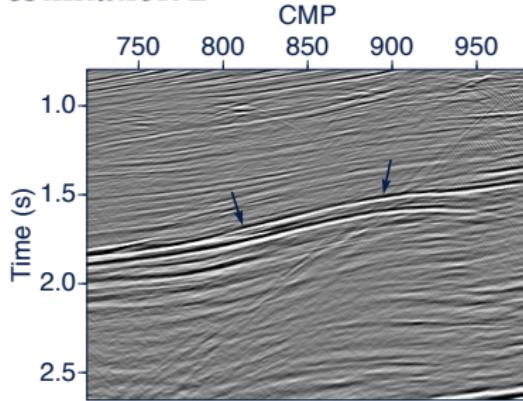
- Estimation 2 – modèle hétérogène selon  $z$
- $V_{\text{nmo}}(0)$  et  $\eta$  obtenus à partir de la vitesse NMO du réflecteur incliné, évaluée en 5 points sur la faille ;
- Région au dessus de 2 s ( $\eta$  atteignant 0.12) correspond à une formation de shale.



# 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

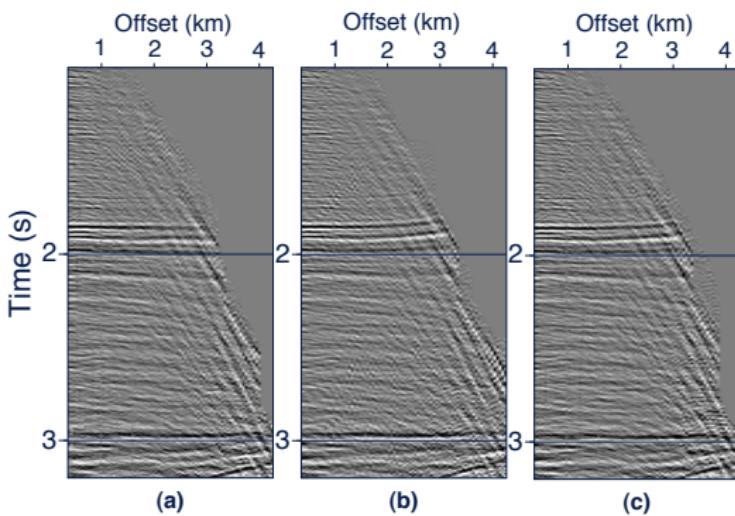
→ section déport nul avec NMO et (a) DMO isotrope vitesse constante, et (b) DMO isotrope  $v(z)$   
 ↓ (c) section déport nul après NMO + DMO anisotrope avec estimation 2



# 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

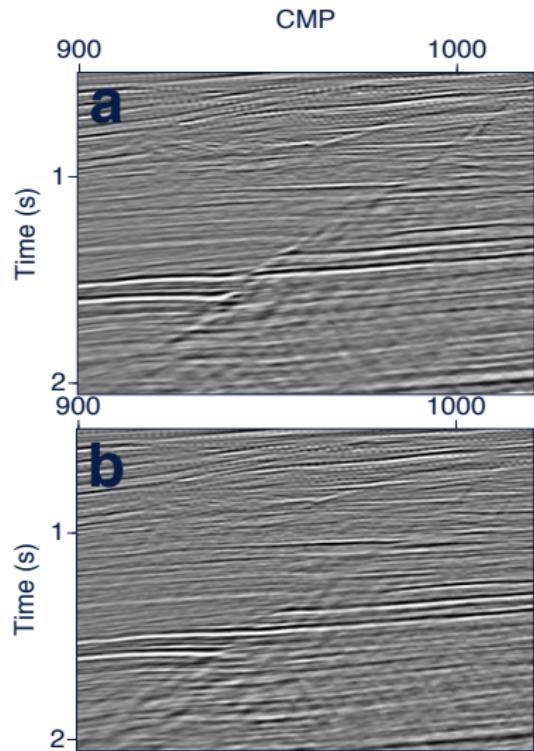
- CMP après (a) TZO anisotrope, (b) NMO et DMO isotrope,  
(c) NMO et DMO  $v(z)$  isotrope



# 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

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

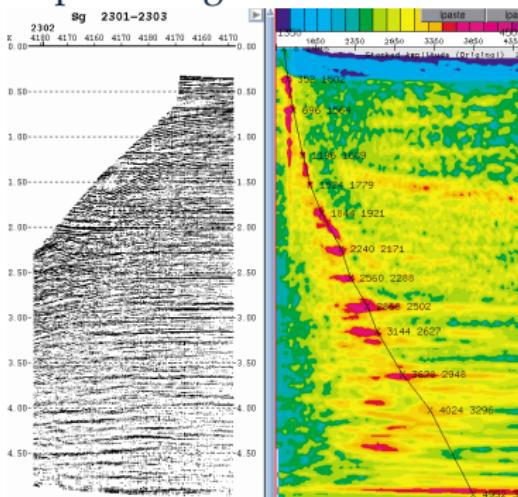


# Analyse de vitesse - exemple

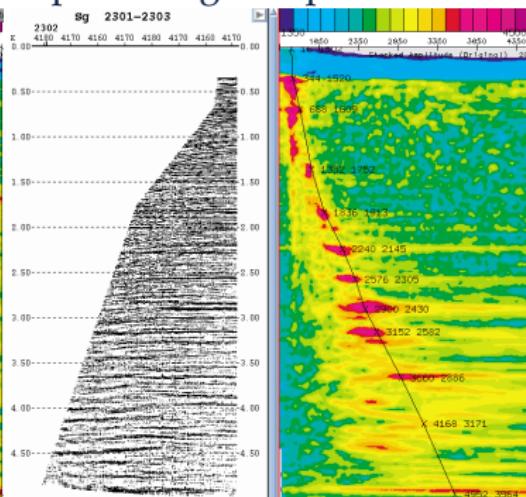
- Introduction
- Théorie de base
- Anisotropie et AVO
- Anisotropie et NMO
- Courbure d'indicatrice non hyperbolique
- Estimation de l'anisotropie
- Méthode TZO
- Exemple – méthode TZO
- Analys de vitesse - exemple
- Annexe
- Références

## CMP après correction NMO d'ordre 2

Départs longs inclus



Départs longs coupés

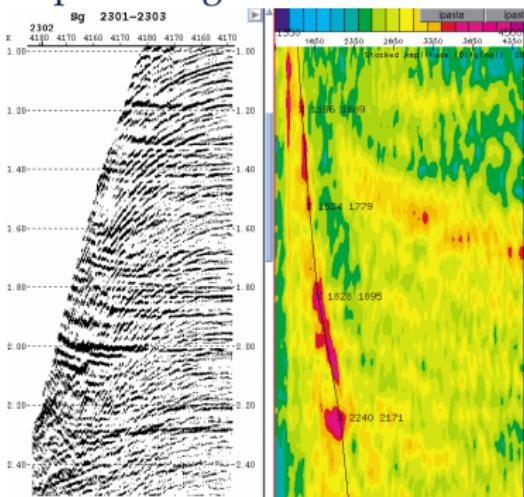


# Analyse de vitesse - exemple

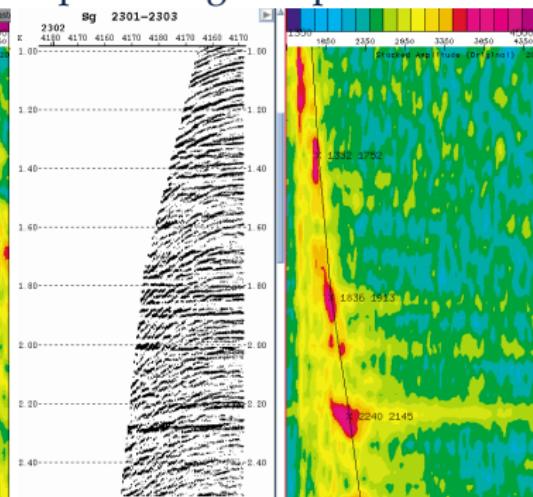
- Introduction
- Théorie de base
- Anisotropie et AVO
- Anisotropie et NMO
- Courbure d'indicatrice non hyperbolique
- Estimation de l'anisotropie
- Méthode TZO
- Exemple – méthode TZO
- Analys de vitesse - exemple
- Annexe
- Références

## Zoom sur CMP après correction NMO d'ordre 2

Départs longs inclus



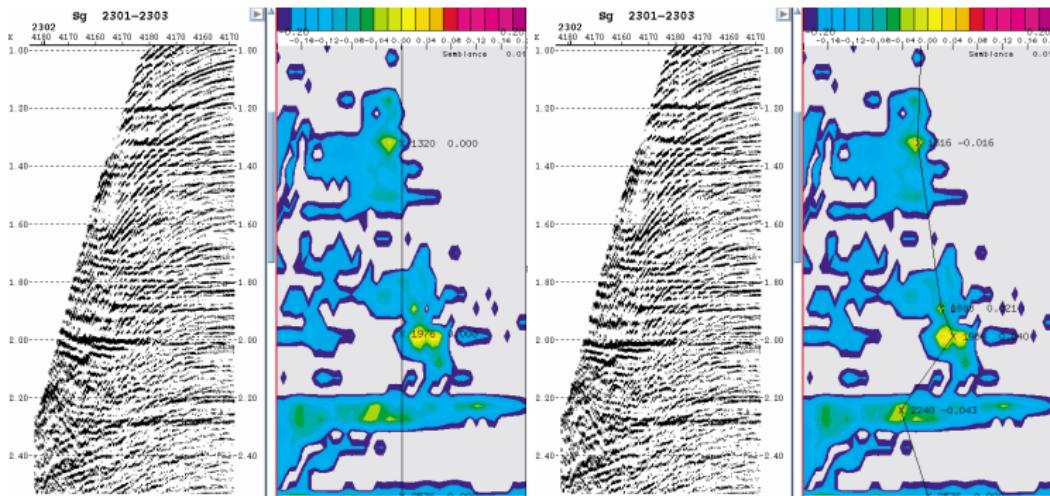
Départs longs coupés



# Analyse de vitesse - exemple

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

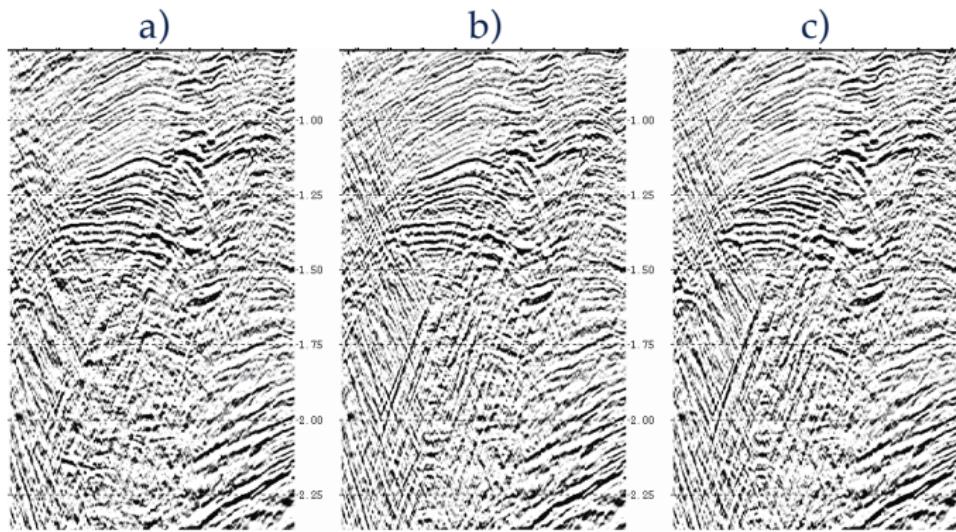
## Spectre du paramètre $\eta$



# Analyse de vitesse - exemple

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

# Analyse de vitesse - exemple

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

Méthode TZO

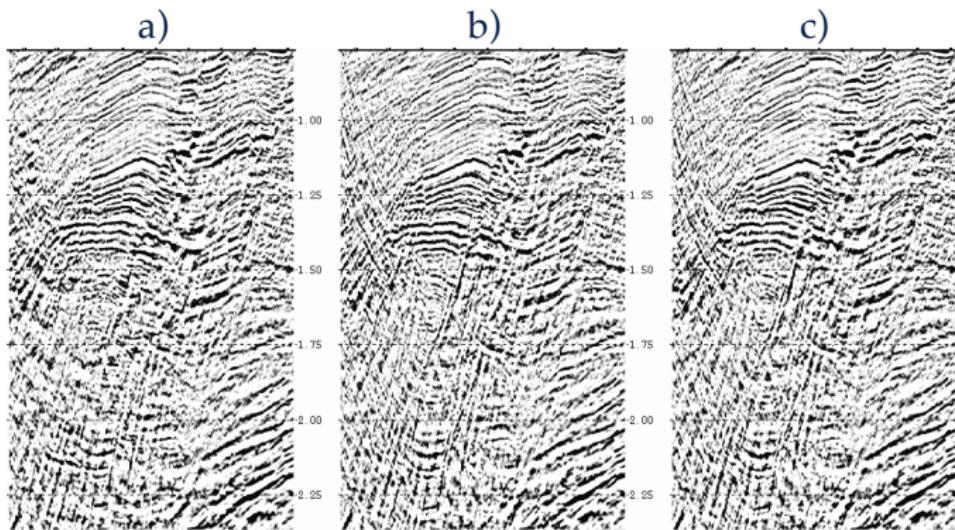
Exemple – méthode  
TZO

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

# Analyse de vitesse - exemple

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

Méthode TZO

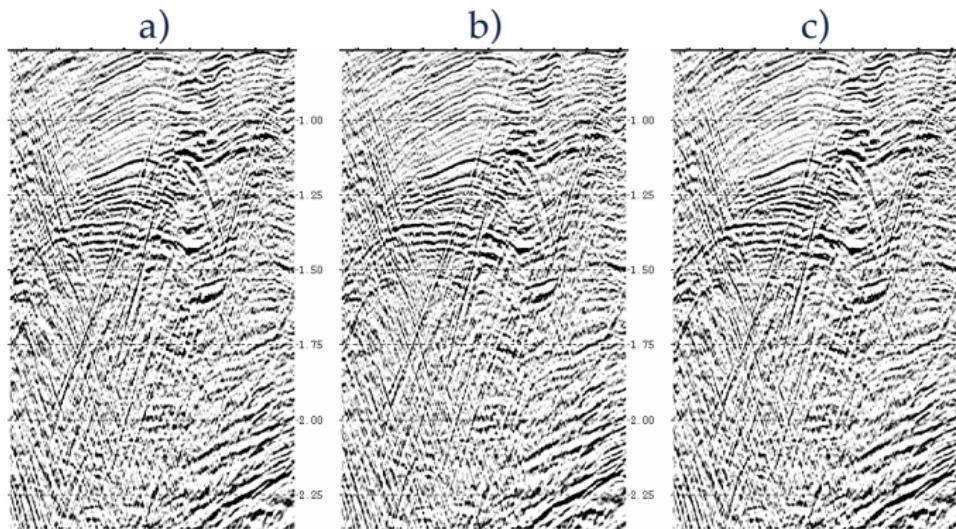
Exemple – méthode  
TZO

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

# Analyse de vitesse - exemple

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

Méthode TZO

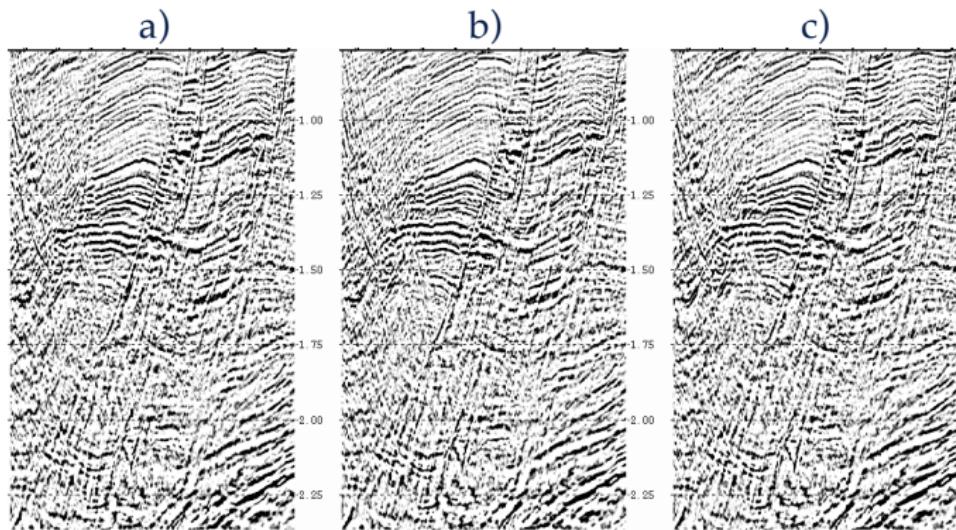
Exemple – méthode  
TZO

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

# Transformée $\tau-p$

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 départs (*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

# Transformée $\tau-p$

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

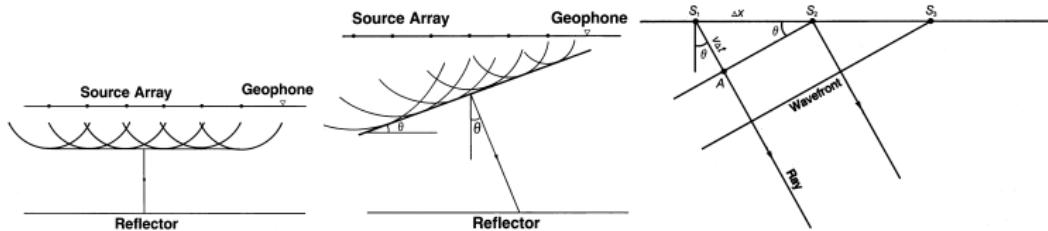
Annexe

Références



- Plusieurs tirs alignés simultanés créent une onde plane horizontale;
- Plusieurs tirs déphasés créent une onde plane inclinée;
- L'inclinaison  $\theta$  est fonction de la vitesse de phase  $v$ , de la distance entre les sources  $\Delta x$  et du délai entre les tirs  $\Delta t$

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



# Transformée $\tau-p$

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

Estimation de  
l'anisotropie

Annexe

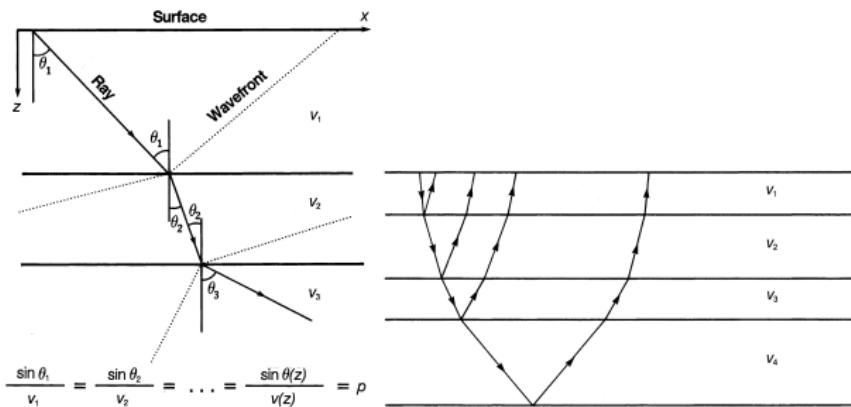
Références

- 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.



# Transformée $\tau-p$

Introduction
Théorie de base
Anisotropie et AVO
Anisotropie et NMO
Courbure d'indicatrice non hyperbolique
Estimation de l'anisotropie
Annexe
Références

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

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

- où  $x$  est le déport,  $t$  le temps double et  $\tau$  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  $\tau-p$  *gather*);
- Note : cette opération est réversible.

# Transformée $\tau-p$

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

Anisotropie et NMO

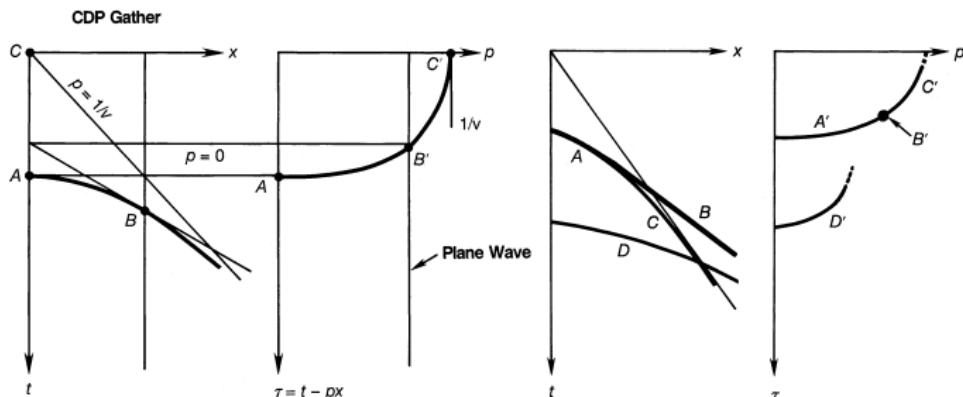
Courbure  
d'indicatrice non  
hyperbolique

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  $\tau-p$ .

# Transformée $\tau$ - $p$

Introduction

Théorie de base

Anisotropie et AVO

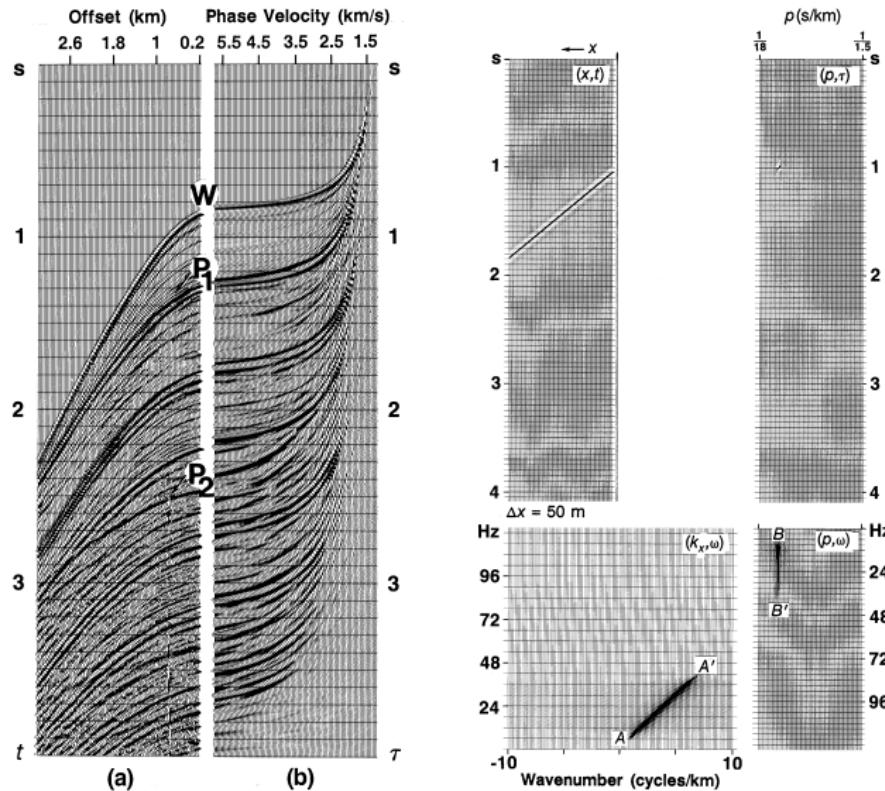
Anisotropie et NMO

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

# 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, 2<sup>nd</sup> 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, 2<sup>nd</sup> edition.
- Rüger, A. (2001). *Reflection Coefficients and Azimuthal AVO Analysis in Anisotropic Media*. Number 10 in *Geophysical Monograph*. SEG.

# Références

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.