

GEO1303 – MÉTHODES SISMIQUES

11 - Profilage sismique vertical

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

Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Version 1.0.1
Automne 2014

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des
données

Applications

Références

Introduction

Introduction

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Applications

Références

- Les mesures en forage permettent d'améliorer la résolution verticale :
 - permet d'établir la relation temps-profondeur de façon précise ;
 - permet de caler la sismique de surface ;
 - fournit une sismique de détail au voisinage d'un puits ;
- Elles permettent d'identifier les réflexions primaires et multiples ;
- Elles permettent de prédire la présence de réflecteurs ou de zones d'anomalies à l'avant du forage, c'est-à-dire sous le puits pour un forage vertical et à l'avant du front de taille d'un tunnel pour un forage horizontal ;
- La sismique en forage est utilisée pour une meilleure connaissance du gisement en phase d'exploration, mais peut être également utilisée en phase d'exploitation en sismique répétitive pour l'étude du gisement au cours du temps (*monitoring*).

Introduction

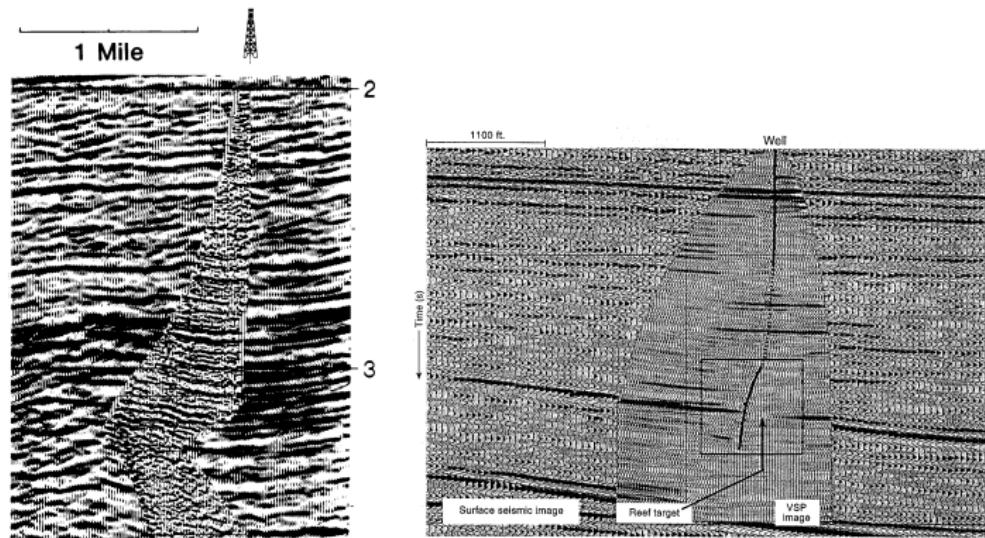
Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Applications

Références



Introduction

Mise en œuvre

Traitement des
données

Applications

Références

Mise en œuvre

Mise en œuvre

Introduction

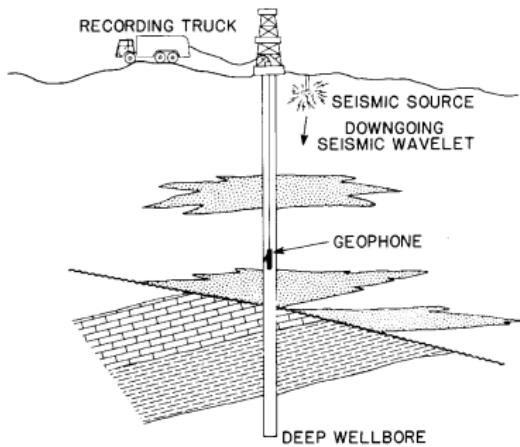
Mise en œuvre

Traitement des données

Applications

Références

- La source est située en surface et les géophones dans le forage (moins de bruit) ;
- Profil déport nul : source proche du trou ;
- PSV déporté : la source est éloignée du trou, i.e. réflexion à plus de 30° impliquant un traitement des données différent.



Considérations générales

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Applications

Références

- On utilise en général une «antenne» comportant plusieurs géophones ;
- On utilise généralement des géophones trois composantes ;
- La distance Δz entre deux positions de géophones doit être faible :

$$\Delta z \leq \frac{v_{min}}{2f_{max}}, \quad (1)$$

où

- v_{min} est la vitesse minimale dans la formation ;
- f_{max} est la fréquence maximale enregistrée.
- Le déport d (source-forage) dépend de la profondeur h de la cible. Pour une imagerie par réflexion, les angles d'incidence ne doivent pas dépasser 30° (traitement plus simple). Une règle pratique donne $d < \frac{3h}{4}$.

Introduction
Mise en œuvre
Traitement des données
Applications
Références

Antenne pour les trous miniers



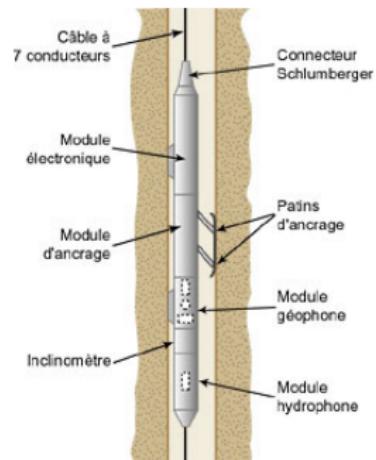
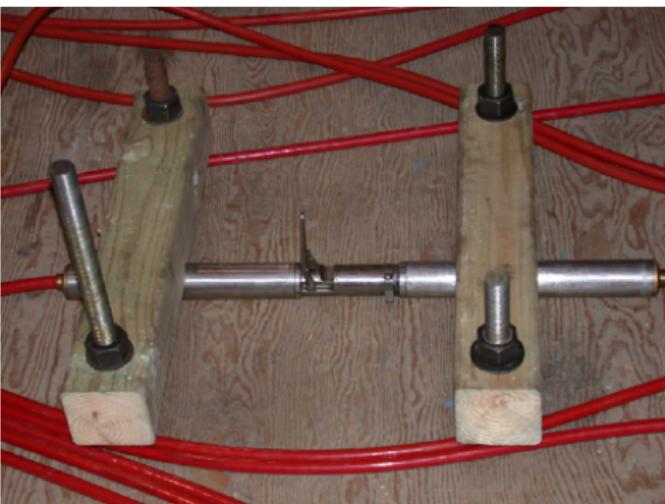
Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Applications

Références



Vue générale

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des
données

Applications

Références



Introduction

Mise en œuvre

Traitement des
données

Applications

Références



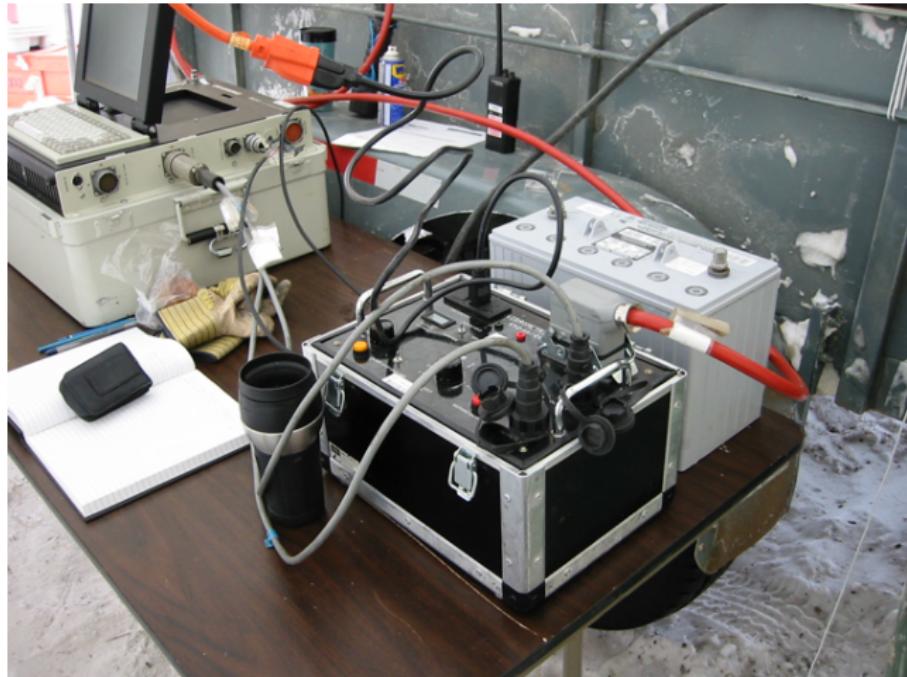
Introduction

Mise en œuvre

Traitement des
données

Applications

Références



Introduction

Mise en œuvre

Traitement des
données

Applications

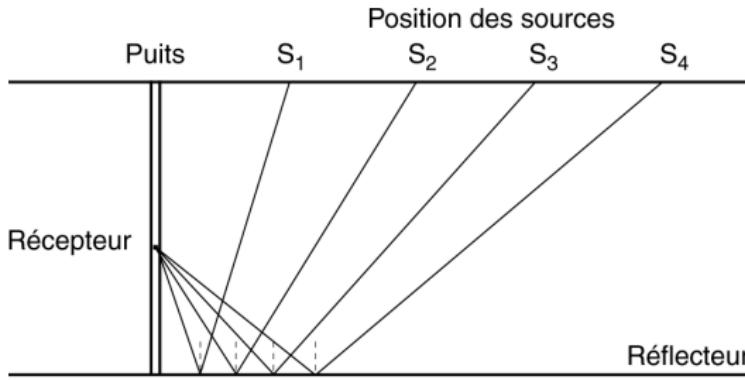
Références



Balade sismique

Introduction
Mise en œuvre
Traitement des données
Applications
Références

- Une ballade sismique ou *walkaway* est un ensemble de PSV déportés ;
- La source occupe successivement plusieurs positions correspondant à des déports croissants par rapport au forage ;
- L'image obtenue après traitement est une section en couverture multiple de faible degré.



Tirs de calibration

Introduction

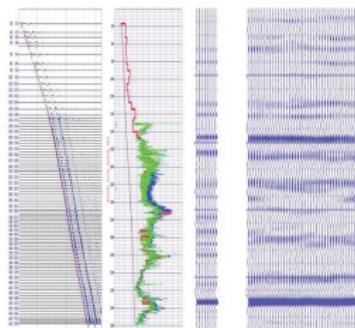
Mise en œuvre

Traitement des données

Applications

Références

- Les tirs de calibration (*check shots*) se font en mesurant la 1^{re} arrivée à plusieurs points le long du trou, pour une source à faible déport ;
- Les avantages sont :
 - Relation temps-profondeur précise ;
 - Analyse de vitesse améliorée ;
 - Calibration des diagraphies soniques
→ sismogrammes synthétiques plus précis ;
 - Meilleure estimation de l'atténuation et du facteur de qualité Q .



Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

Traitement des données

Schéma général

Introduction

Mise en œuvre

Traitements des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

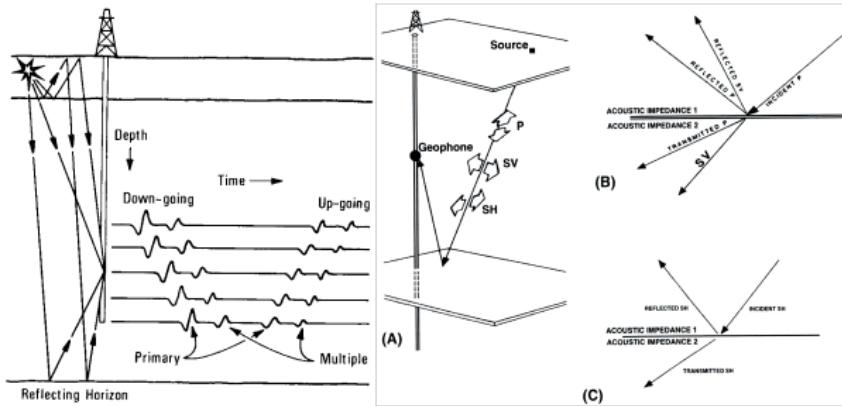
La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

- Un enregistrement PSV est composé d'ondes ascendantes et descendantes P et S, ainsi que des modes guidés liés à la présence du puits et du fluide.



- Lorsque la source est déportée on observe des phénomènes de conversion au réflecteur : des ondes S s'ajoutent aux enregistrements.

Schéma général

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

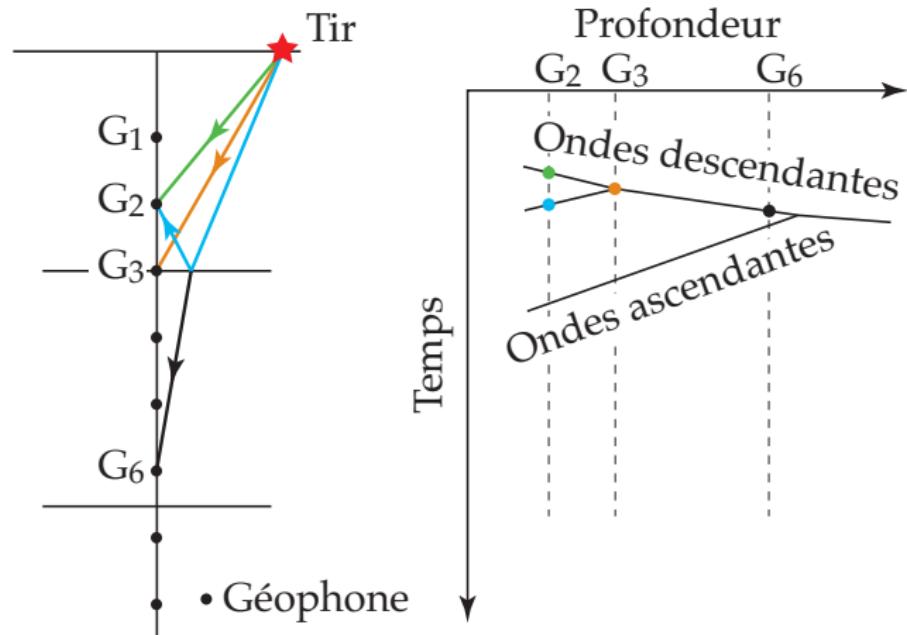


Schéma général

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

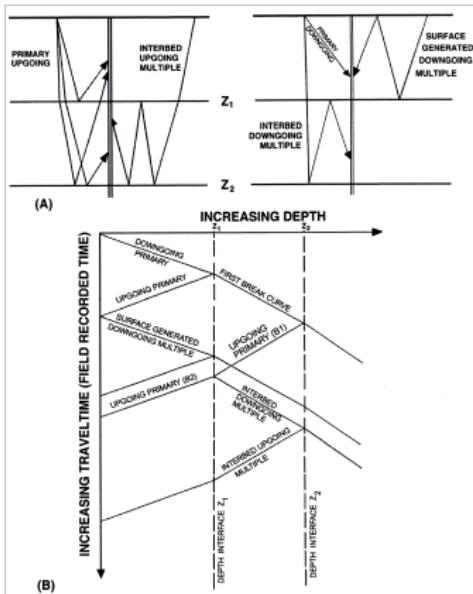
Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes
Obtention de l'image finale

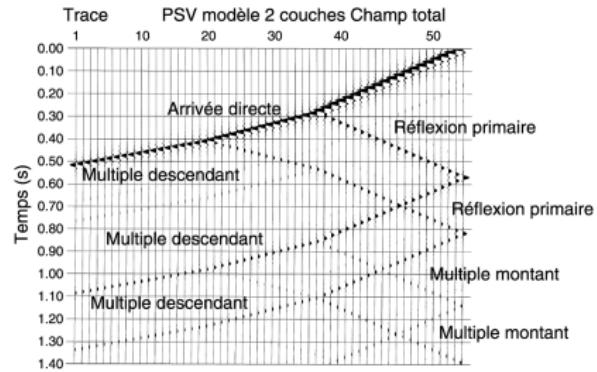
Applications

Références

- Les ondes descendantes sont émises par la source, formant les arrivées directes, et sont l'ensemble des évènements multiples descendants créés par les réflecteurs situés au-dessus du géophone ;



- Les ondes ascendantes sont les ondes réfléchies primaires ou multiples ascendants.



Ondes de tube (Stoneley)

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

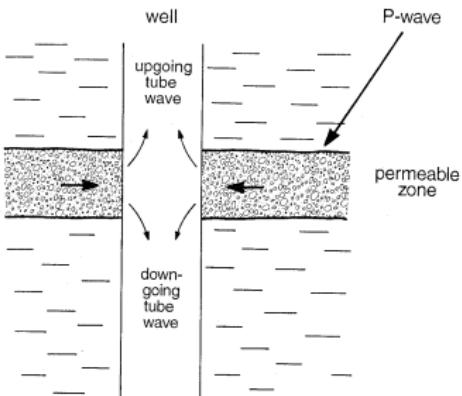
Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes
Obtention de l'image finale

Applications

Références

- Les ondes de tubes se propagent dans le fluide de forage.
- Ces ondes peuvent être générées lorsqu'une onde P frappe un contraste élevé d'impédance comme
 - des jonctions dans la crépine ou à un changement de diamètre du trou ;
 - un changement de lithologie.
- Les ondes de Rayleigh en surface, incidentes à la tête de puits sont la source principale.



Ondes de tube (Stoneley)

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

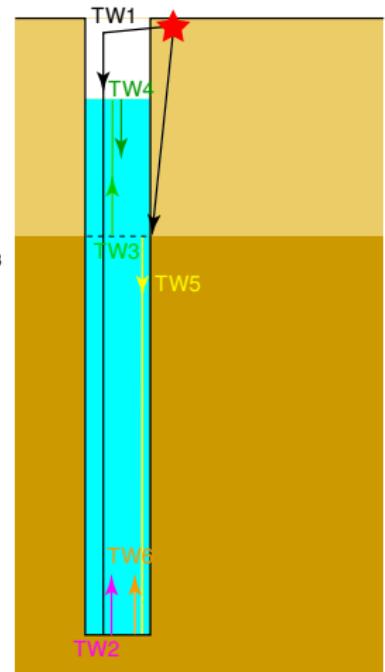
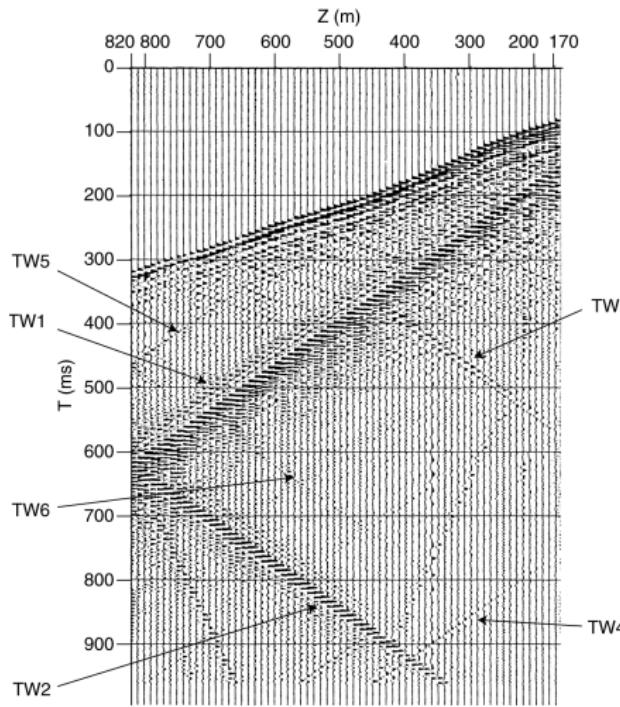
Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes
Obtention de l'image finale

Applications

Références



Note : V_P dans l'eau ≈ 1450 m/s

Séquence de pré-traitement

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

- Le démultiplexage des données ;
- La corrélation, si la source sismique est une source vibratoire située en surface ou si la source est l'outil de forage ;
- La correction de l'effet de fluctuation de signature et de dérive de la source ;
- Les corrections de rotation du géophone et de déviation de puits ;
- L'élimination des enregistrements de mauvaise qualité ;
- La sommation des enregistrements obtenus à la même cote ;
- Les corrections de type divergence géométrique et absorption ;
- Le tri en composantes, si le géophone utilisé est à trois composantes.

Correction de dérive de la source

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

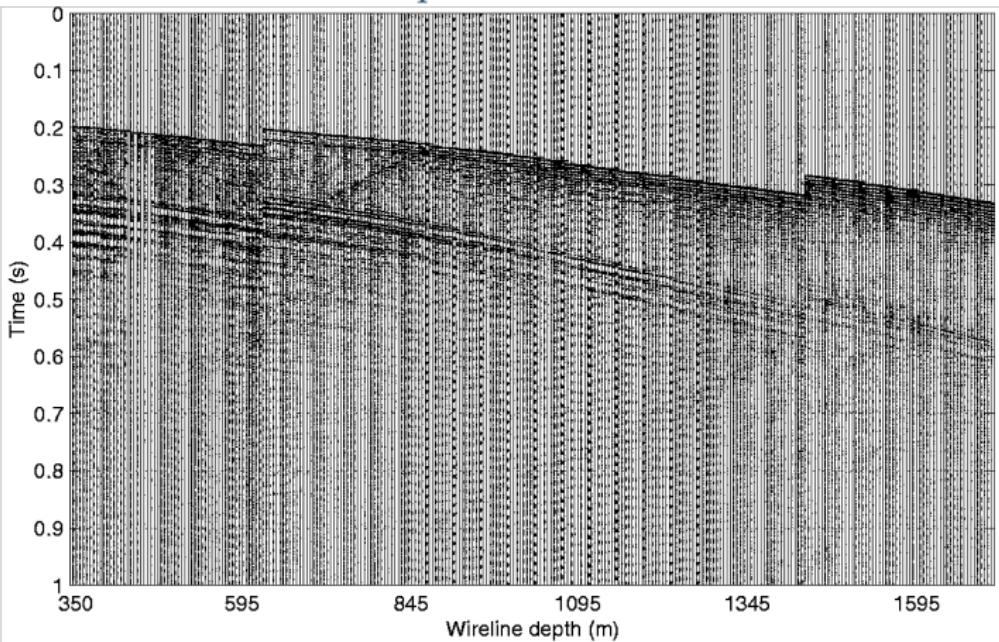
Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes
Obtention de l'image finale

Applications

Références

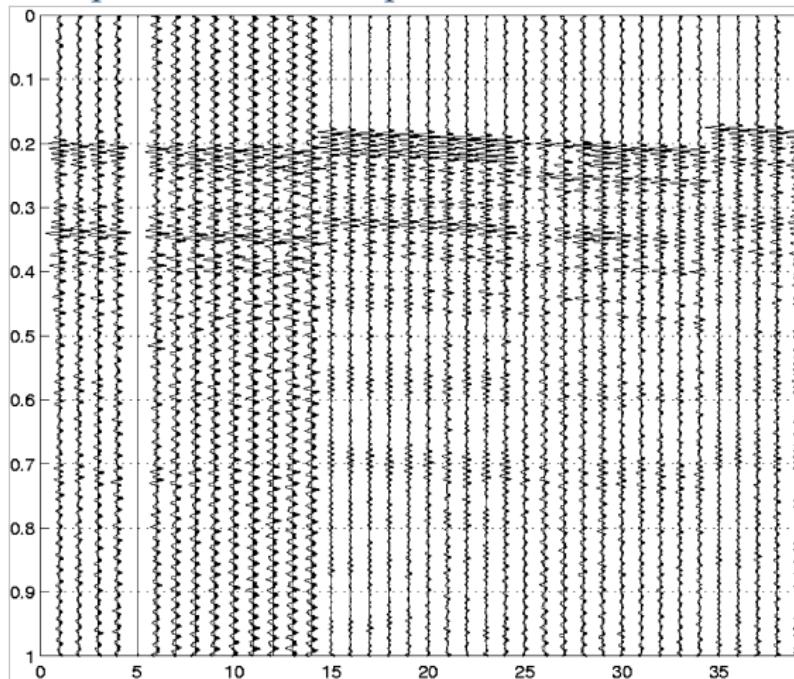
Plusieurs tirs, temps zéro de la source variable



Correction de dérive de la source

Introduction
Mise en œuvre
Traitement des données
Les ondes enregistrées
La phase de pré-traitement
Déconvolution prédictive
Le pointé des temps d'arrivée
La séparation des ondes
Obtention de l'image finale
Applications
Références

Géophone de surface pour déterminer le délai



Correction de dérive de la source

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

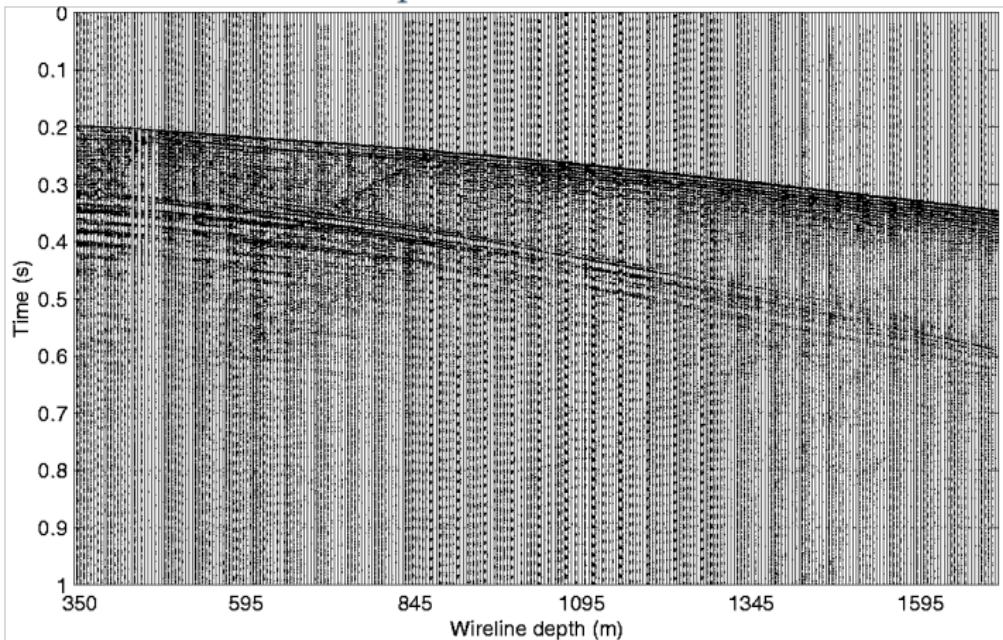
La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

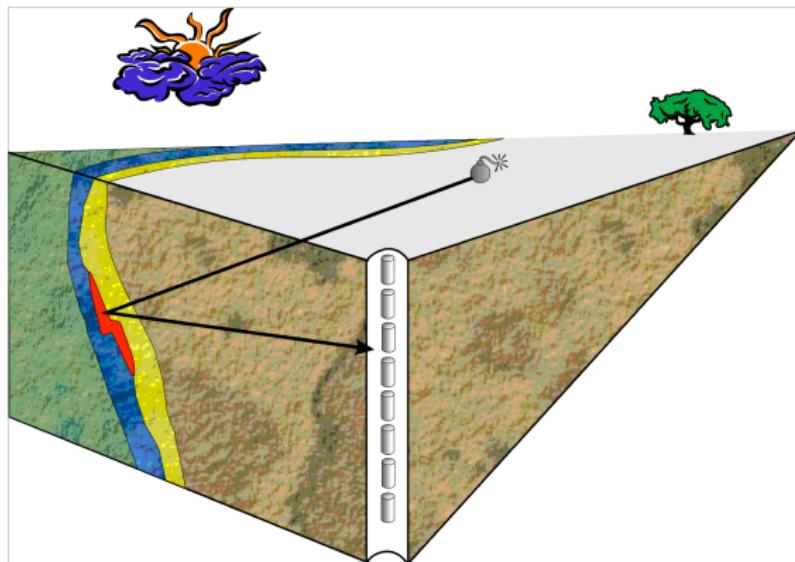
Après correction



Géophones tri-axiaux

Introduction
Mise en œuvre
Traitement des données
Les ondes enregistrées
La phase de pré-traitement
Déconvolution prédictive
Le pointé des temps d'arrivée
La séparation des ondes
Obtention de l'image finale
Applications
Références

- Ambiguité sur la position du réflecteur ;
- Peut-on déterminer l'orientation et le pendage d'un réflecteur ?



Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

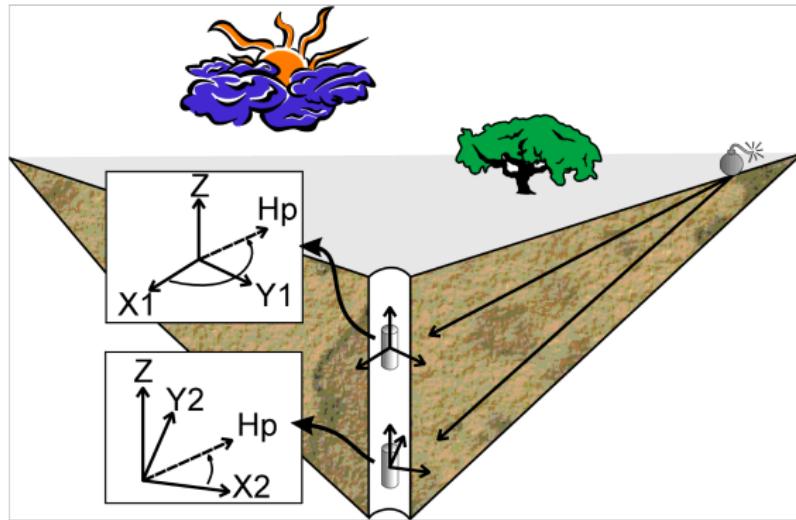
Obtention de l'image finale

Applications

Références

● Géophones tri-axiaux :

- Trois composantes orthogonales : deux horizontales, une verticale.
- Les géophones ne sont généralement pas orientés dans la même direction.



Géophones tri-axiaux

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

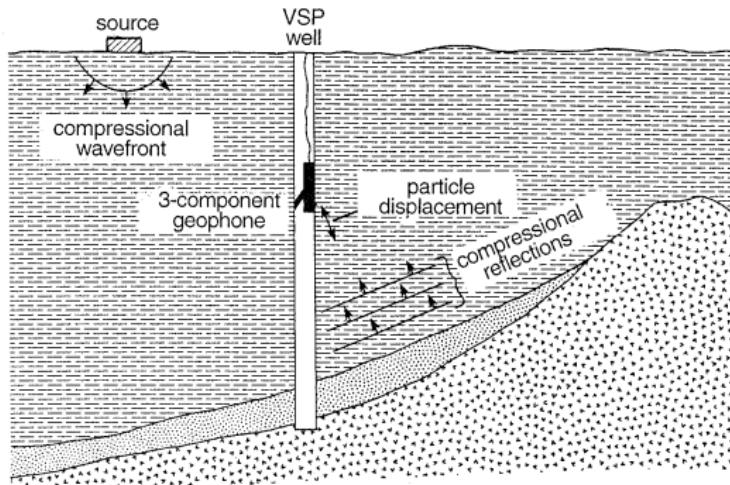
La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

- La direction de l'onde P nous renseigne sur l'orientation et le pendage du réflecteur.



Rotation des composantes

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

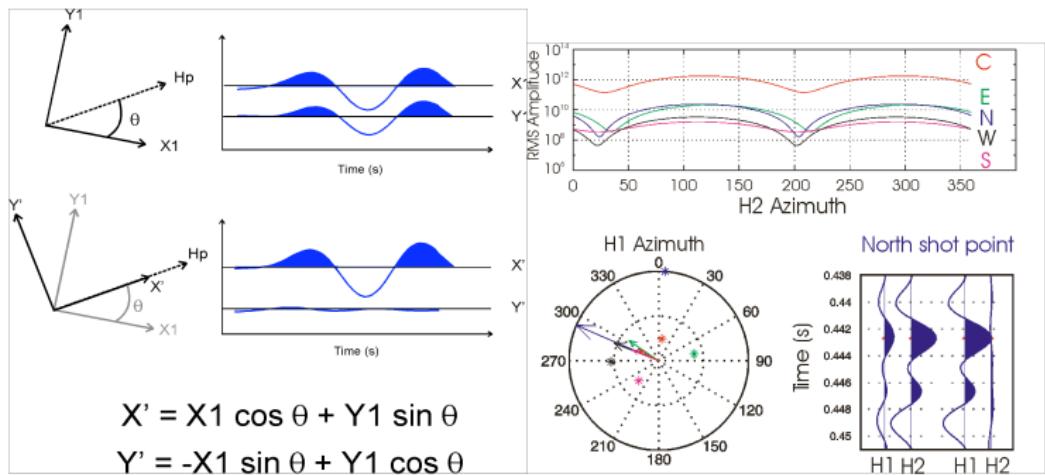
La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

- Condition : la direction initiale des géophones doit être connue (inclinomètre ou magnétomètre);
- On traite ici l'onde P , qu'il faut isoler pour faire l'opération.



Rotation des composantes

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

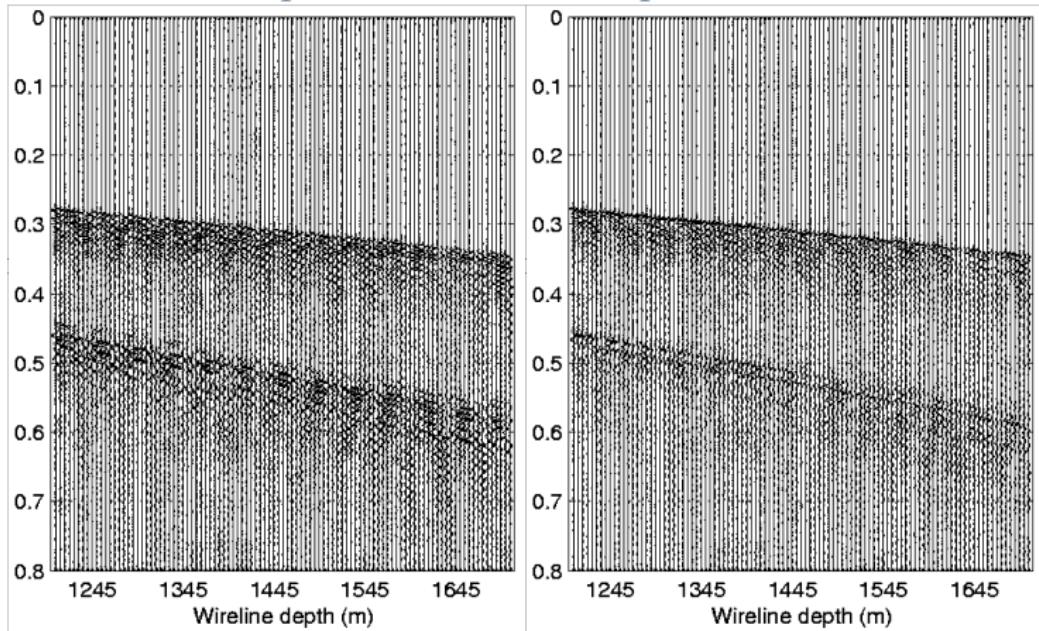
La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

Composante H1 avant et après rotation



Rotation des composantes

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

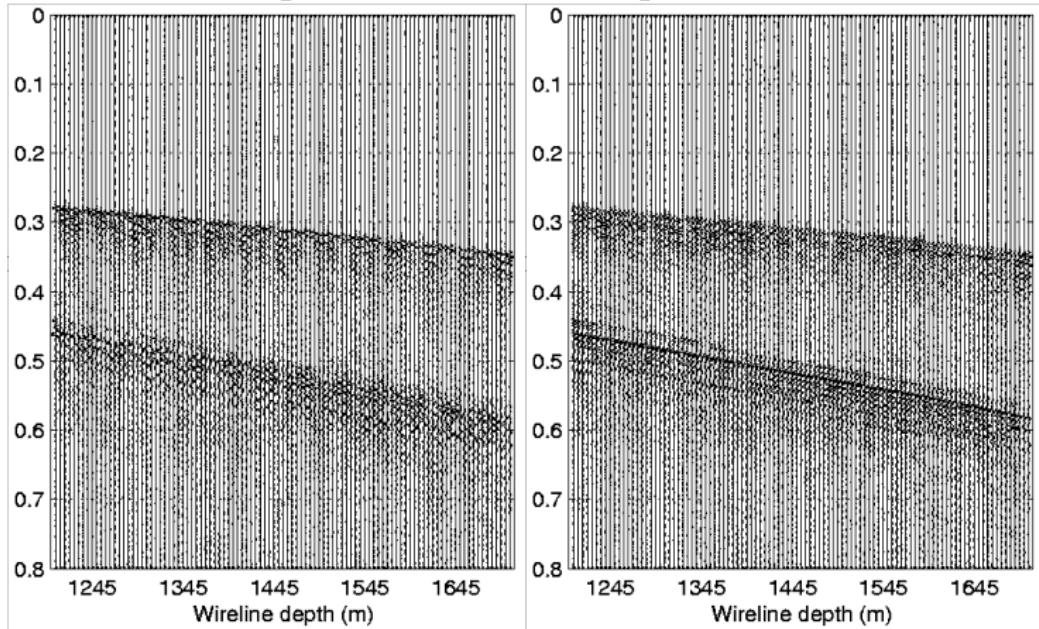
La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

Composante H2 avant et après rotation



Déconvolution prédictive

Introduction

Mise en œuvre

Traitements des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

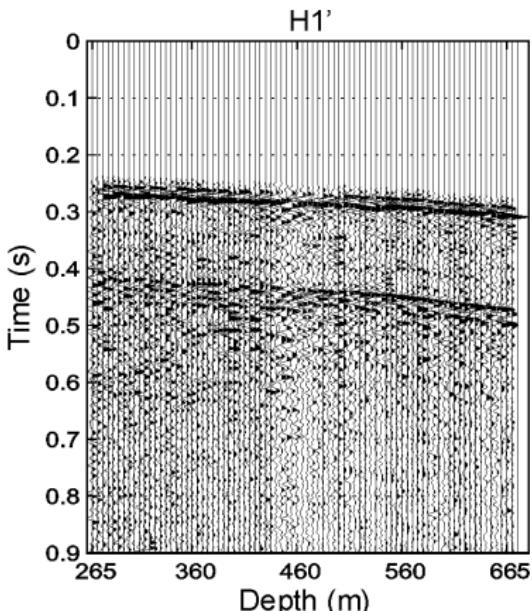
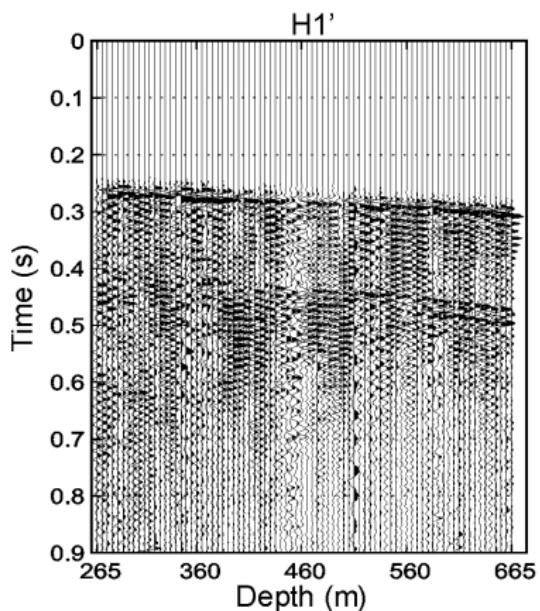
Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes
Obtention de l'image finale

Applications

Références



Le pointé des temps d'arrivée

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

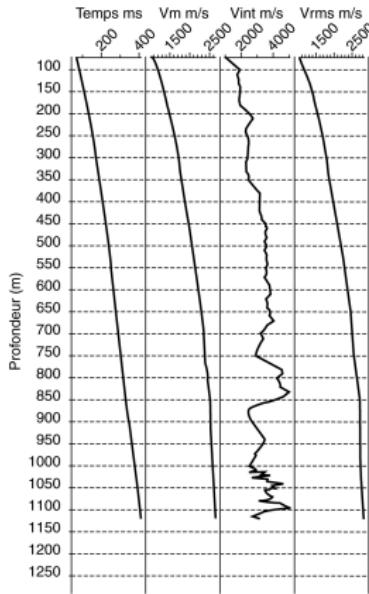
La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

- La seconde séquence de traitement consiste à pointer les temps des premières arrivées qui fournissent la loi temps-profondeur et les différents logs de vitesse.



La séparation des ondes

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

- L'enregistrement de sismique de puits est composé d'ondes de volume de type P et/ou S descendantes et ascendantes, ainsi que des modes guidés d'interface liés à la présence du puits (ondes de tube) ;
- Or, pour l'interprétation on cherche à ne garder que les premières réflexions, i.e. les premières ondes ascendantes ;
- Sur l'enregistrement, les ondes descendantes sont caractérisées par des vitesses apparentes ($\Delta z / \Delta t$) positives, les ondes ascendantes par des vitesses apparentes négatives. Ce fait est à la base de la plupart des méthodes de séparation.

La séparation des ondes

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

- Les méthodes de séparation d'ondes peuvent être divisées en deux catégories :
 - Les méthodes qui nécessitent que la section sismique de puits soit horizontalisée sur le temps de l'arrivée directe avant que l'algorithme de séparation ne soit appliqué :
 - Le filtre par somme et différence, le filtre médian, le filtre de Wiener, le filtre en vitesse apparente si la distance entre cotes n'est pas régulière, le filtre par décomposition en valeurs singulières (SVD) ;
 - Les méthodes qui ne nécessitent pas d'horizontalisation :
 - Les filtres basés sur la matrice spectrale (SMF), les méthodes paramétriques, le filtre en vitesse apparente si la distance entre cotes est régulière.
 - Il existe des méthodes de séparation non basées sur le critère de vitesse apparente, notamment les filtres de polarisation pour l'extraction des ondes P et des ondes S ;
 - Il est souvent nécessaire de combiner plusieurs méthodes pour obtenir une séparation d'ondes optimale.

Le filtre médian

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

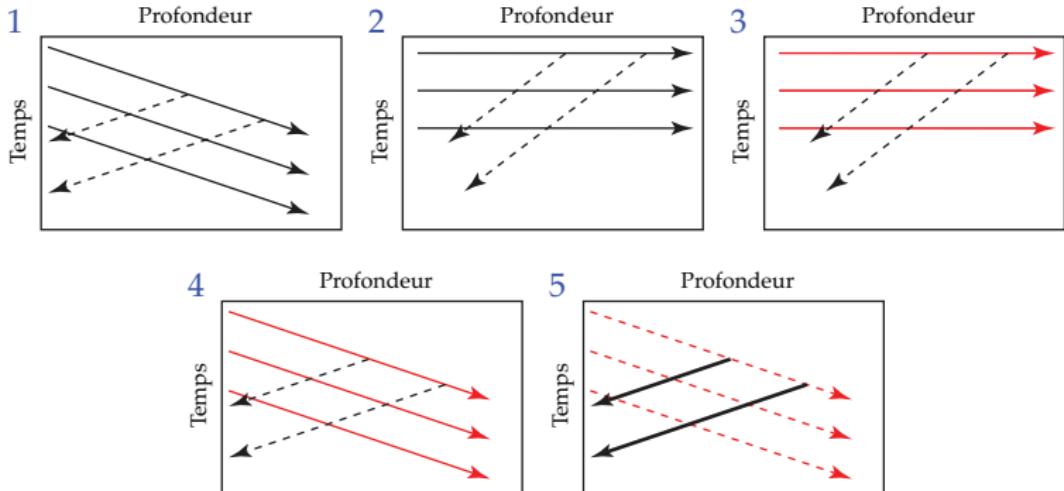
● Une méthode simple et courante : le filtre médian

- Le pointé des 1^{re} arrivées est requis pour horizontaliser les arrivées ;
- Les ondes descendantes sont ainsi horizontalisées ;
- Le filtre médian est appliqué dans la direction horizontale, i.e. la direction de la profondeur ;
- Le filtre lisse les pics isolés (bruit) et élimine ainsi les événements non horizontaux ;
- Il reste donc les ondes descendantes dans les données filtrées ;
- On soustrait alors les données filtrées aux données initiales pour ne conserver que les ondes ascendantes.

Le filtre médian

Introduction
Mise en œuvre
Traitement des données
Les ondes enregistrées
La phase de pré-traitement
Déconvolution prédictive
Le pointé des temps d'arrivée
La séparation des ondes
Obtention de l'image finale
Applications
Références

• Filtre médian appliqué sur des données PSV



Le filtre médian

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

- Exemple de filtre médian à 5 points :

- Soit une séquence de données

 $1, 8, 111, 3, 5;$

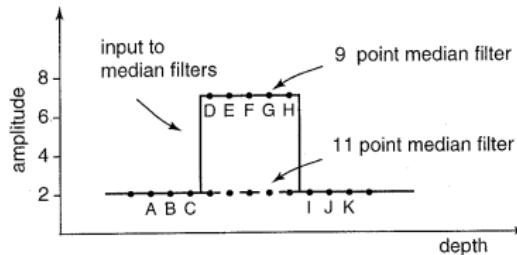
- Les données sont classées en ordre croissant

 $1, 3, 5, 8, 111;$

- La valeur médiane est 5;
 - La sortie du filtre est

 $5, 5, 5, 5, 5.$

- Le filtre médian est coulissant, i.e. il est appliquée de façon itérative en progressant le long de la séquence de données.



Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références

- La déconvolution des ondes ascendantes par les ondes descendantes ;
 - Le traitement de déconvolution permet de s'affranchir à la fois du signal de la source et des multiples descendants.
- L'horizontalisation des ondes ascendantes déconvolues ;
 - Cette opération rend l'enregistrement PSV comparable en temps (temps double) à un enregistrement de sismique réflexion de surface (réflecteurs horizontaux) ;
- L'obtention de la trace sommée PSV ;
 - Les ondes ascendantes déconvolues et horizontalisées sont sommées dans un couloir suivant immédiatement la première arrivée ;
 - Le résultat est une trace somme comparable à la trace sismique obtenue par la sismique de surface après sommation en couverture multiple.

PSV déport nul

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

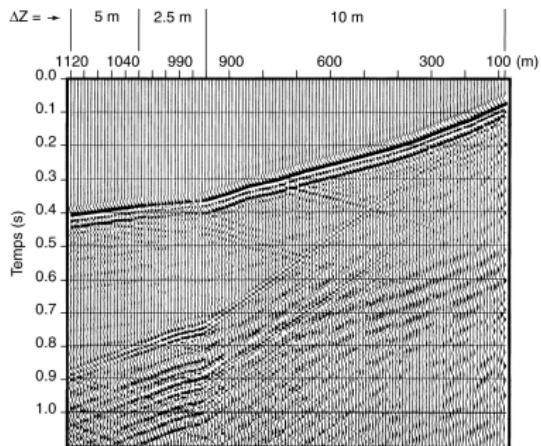
Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

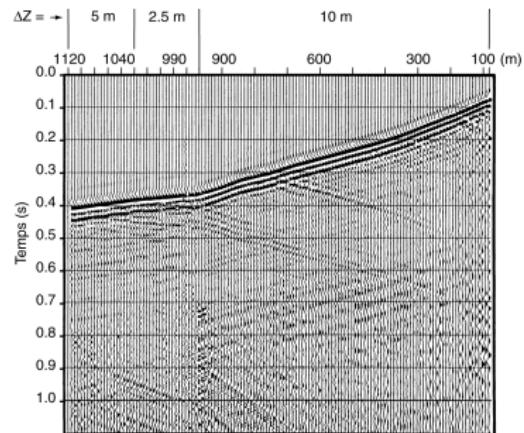
Obtention de l'image finale

Applications

Références



Après pré-traitement



Filtrage des ondes de tube

PSV déport nul

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

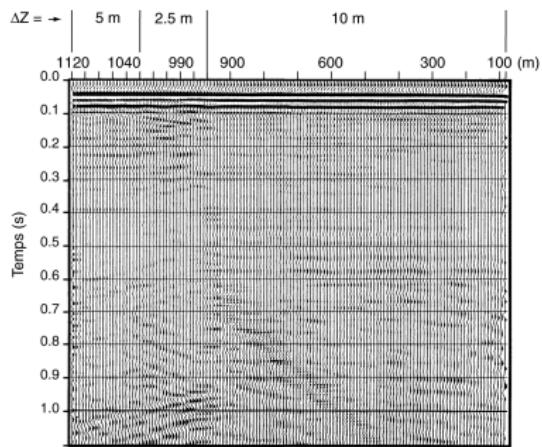
Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

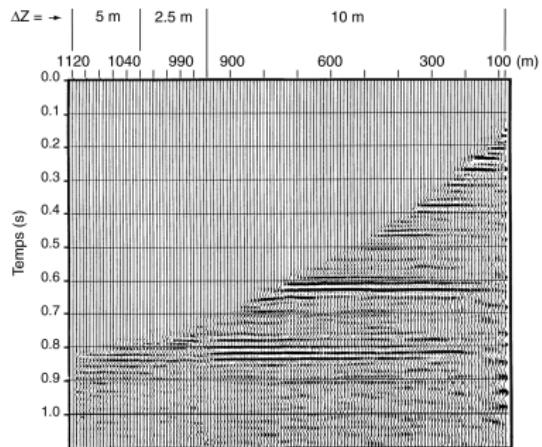
Obtention de l'image finale

Applications

Références



Extraction et horizontalisation des ondes descendantes



Extraction et horizontalisation des ondes ascendantes

PSV déport nul

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

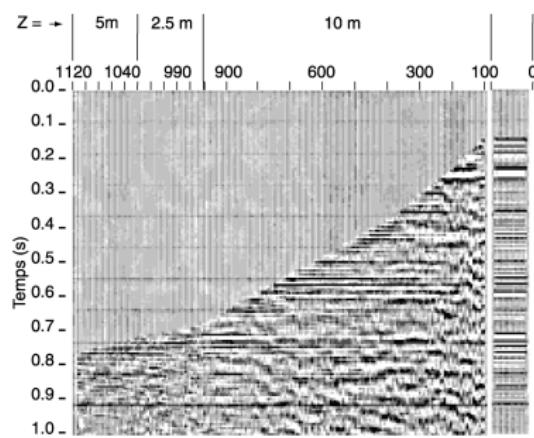
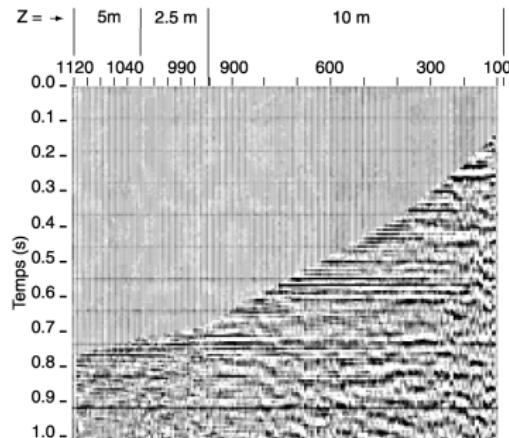
Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

Références



Déconvolution des ondes ascendantes par les ondes descendantes

Traces avant sommation (gauche) et sommées (droite)

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

Obtention de l'image finale

Applications

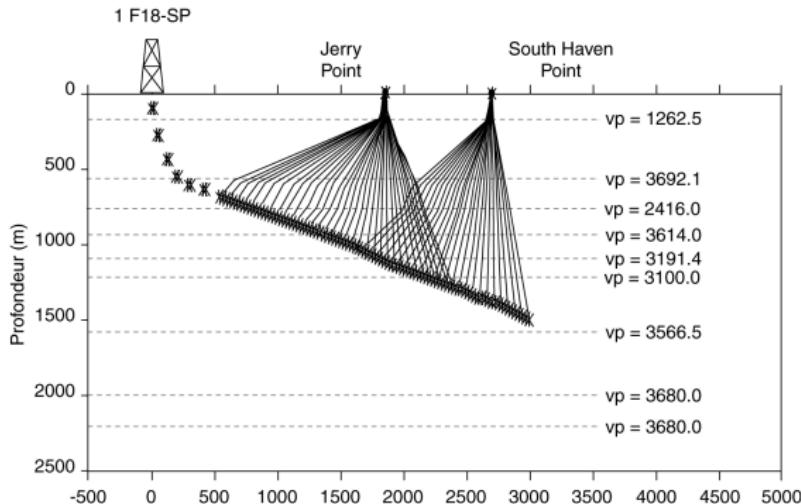
Références

- La déconvolution des ondes ascendantes ;
 - L'opérateur de déconvolution est unique ;
 - Il est extrait des traces de fond de puits et permet de s'affranchir du signal source ;
- La correction dynamique et la mise en temps double des ondes ascendantes déconvoluées ;
 - Elle compense l'obligation induite par le déport de la source ;
 - Elle a pour objet de prendre en compte la géométrie d'acquisition ;
 - Pour cette correction, le modèle de vitesse est requis ;
- La migration : Une méthode couramment utilisée en PSV est celle proposée par Wyatt (1981) ;
 - La section sismique PSV migrée est directement comparable à une section sismique réflexion de surface ;
 - Elle a une investigation latérale de quelques dizaines à quelques centaines de mètres.

PSV déporté

Introduction
Mise en œuvre
Traitement des données
Les ondes enregistrées
La phase de pré-traitement
Déconvolution prédictive
Le pointé des temps d'arrivée
La séparation des ondes
Obtention de l'image finale
Applications
Références

- Forage incliné (déviation maximale de 88.5°) ;
- Source : vibroseis [10-80 Hz] ;
- Géophones trois composantes.



PSV déporté

Introduction

Mise en œuvre

Traitement des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

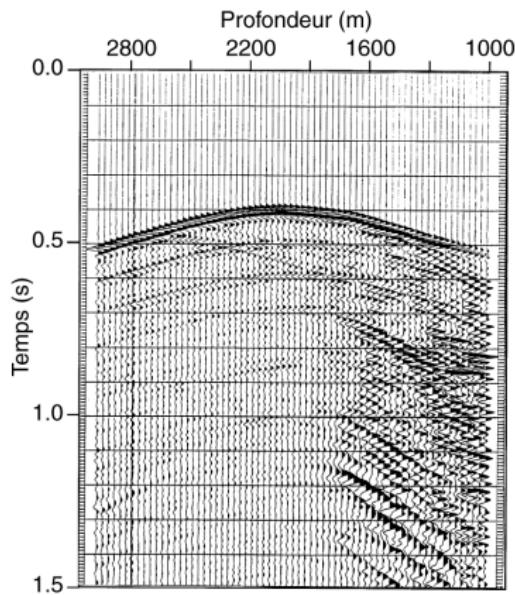
Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

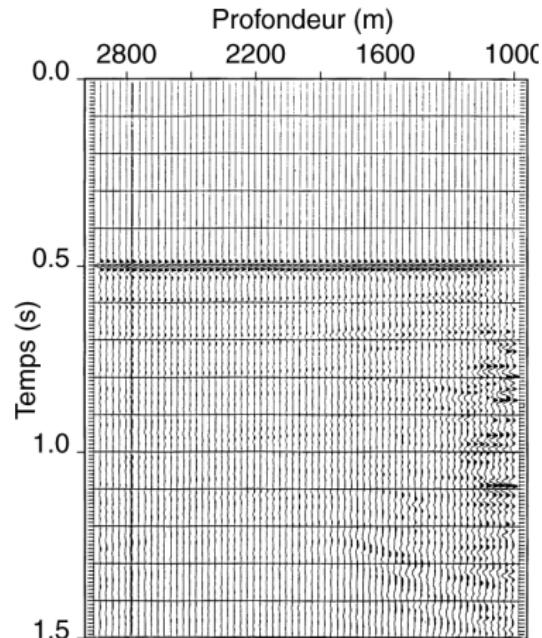
Obtention de l'image finale

Applications

Références



Filtrage en fréquence et récupération d'amplitude



Ondes descendantes mises à l'horizontal

PSV déporté

Introduction

Mise en œuvre

Traitements des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

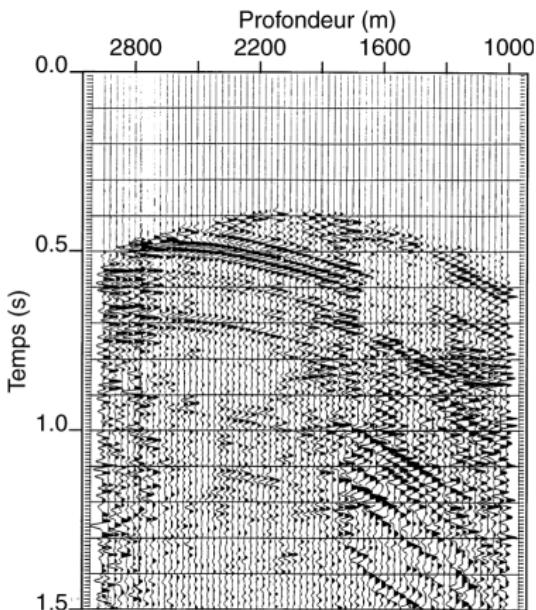
Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

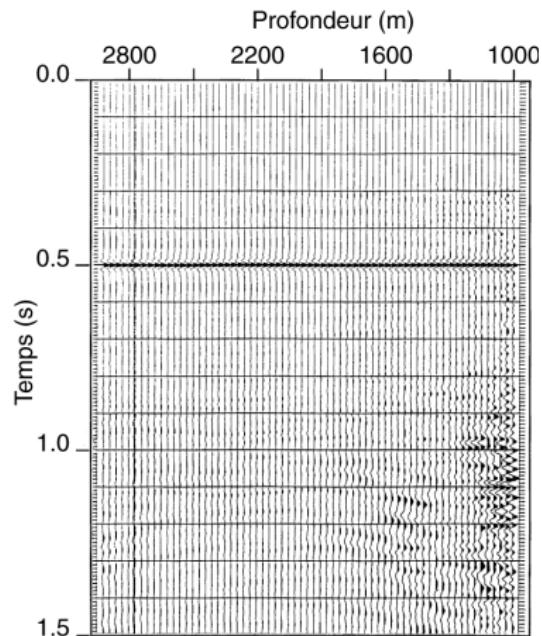
Obtention de l'image finale

Applications

Références



Section PSV résidu (ondes ascendantes)



Ondes descendantes après déconvolution de Weiner transformation phase nulle

PSV déporté

Introduction

Mise en œuvre

Traitements des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

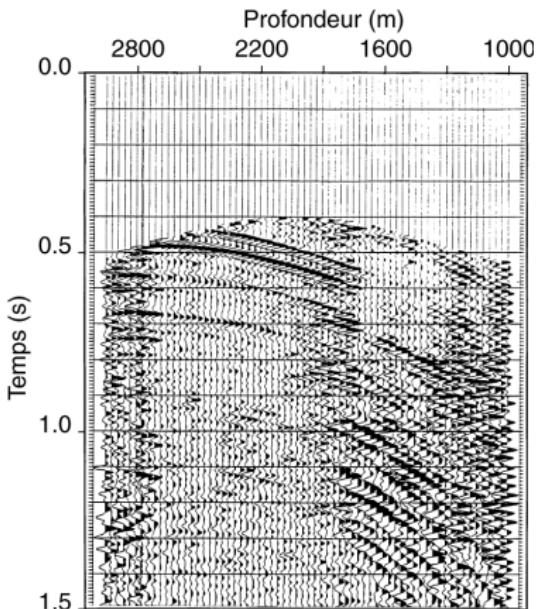
Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

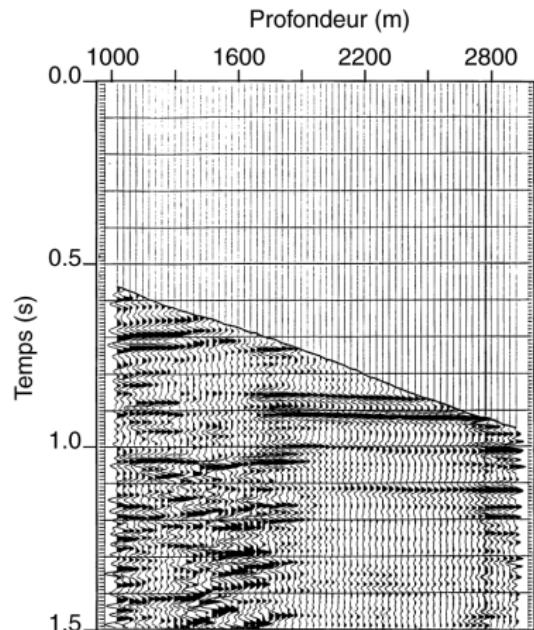
Obtention de l'image finale

Applications

Références



Ondes ascendantes après déconvolution de Wiener



Ondes ascendantes après déconvolution de Wiener et corrections dynamiques

PSV déporté

Introduction

Mise en œuvre

Traitements des données

Les ondes enregistrées

La phase de pré-traitement

Déconvolution prédictive

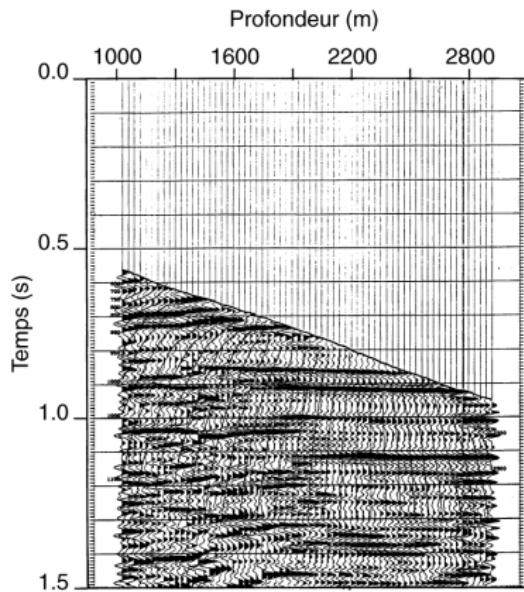
Le pointé des temps d'arrivée

La séparation des ondes

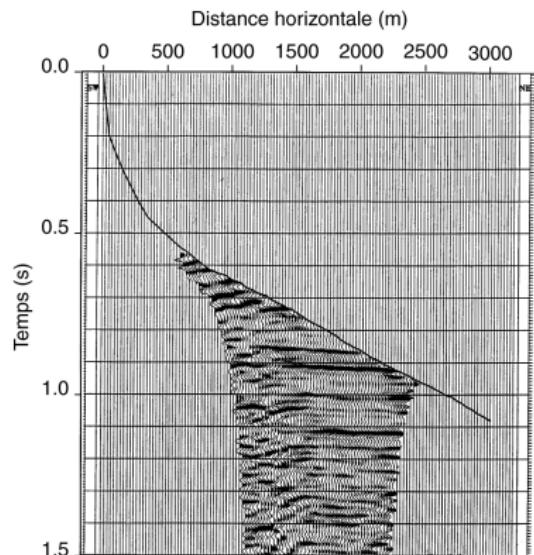
Obtention de l'image finale

Applications

Références



Calcul des lignes d'égale abscisse X des points miroir



Section migrée

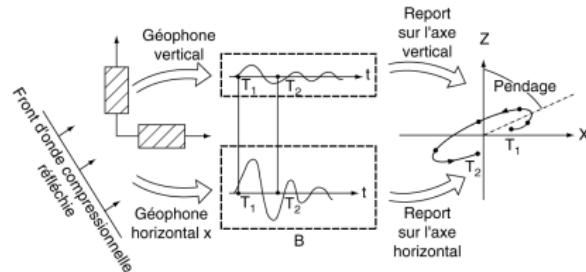
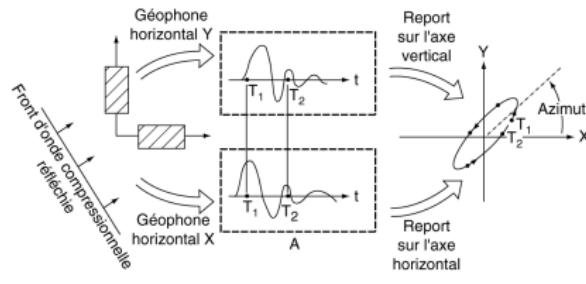
Introduction
Mise en œuvre
Traitement des
données
Applications
Références

Applications

Pendagémétrie

Introduction
Mise en œuvre
Traitement des données
Applications
Références

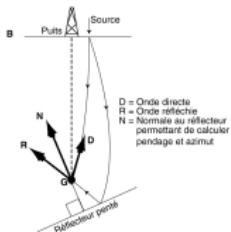
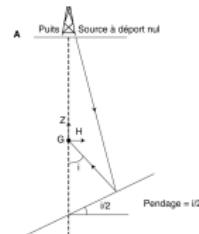
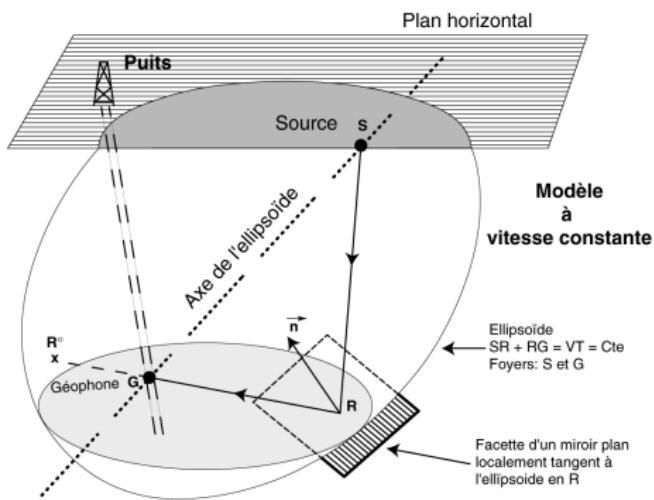
- Les capteurs tri-axiaux permettent d'établir l'ellipticité du mouvement des particules au passage de l'onde, et ainsi la direction de propagation de l'onde ;



Pendagémétrie

Introduction
Mise en œuvre
Traitement des données
Applications
Références

- La connaissance de la direction de propagation de l'onde réfléchie au récepteur permet de localiser deux points de réflexion sur l'ellipsoïde,
 - l'un au dessous du récepteur, cas le plus probable,
 - l'autre au dessus du récepteur, rarement réaliste.



Introduction
Mise en œuvre
Traitement des
données
Applications
Références

Références

Références

Introduction
Mise en œuvre
Traitement des données
Applications
Références

- Hardage, B. A. (2000). *Vertical Seismic Profiling : Principles*, volume 14 of *Handbook of Geophysical Exploration*. Pergamon, 3 edition.
- Mari, J.-L. (2010). *Sismique de puits*. Université de Lausanne - Institut Français du Pétrole. cours online http://www-ig.unil.ch/cours/c_sisf.htm.