

Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage spatial
Format des fichiers de données
Récupération des amplitudes

GEO1303 – Méthodes sismiques

3 - Planification & design des levés de sismique réflexion terrestre

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

Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Version 1.0.9
Automne 2019

Introduction

Objectifs d'un levé

Points particuliers à surveiller

Mise en œuvre

Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage spatial

Format des fichiers de données

Récupération des amplitudes

Introduction

Généralités

Introduction

Objectifs d'un levé

Points particuliers à surveiller

Mise en œuvre

Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage spatial

Format des fichiers de données

Récupération des amplitudes

Le design et la planification d'un levé sont dictés par la cible géologique recherchée, en particulier

- le contraste de propriétés physiques;
- la géométrie;
- l'extension latérale;
- la profondeur.

Les paramètres principaux du levé sont

- l'espacement entre les lignes;
- la longueur des lignes;
- le temps d'enregistrement;
- l'orientation des lignes (\perp aux structures).

Objectifs d'un levé

Introduction

Objectifs d'un levé

Points particuliers à surveiller

Mise en œuvre

Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage spatial

Format des fichiers de données

Récupération des amplitudes

- ① Obtenir des données représentatives et interprétables du sous-sol;
- ② Acquérir le plus de données de qualité pour le budget disponible.

1^{er} objectif

Introduction

Objectifs d'un levé

Points particuliers à surveiller

Mise en œuvre

Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage spatial

Format des fichiers de données

Récupération des amplitudes

Les points à considérer sont :

a) Résolution latérale et verticale

- Espacement entre les géophones;
- Fréquence dominante et largeur de bande (*bandwidth*) du signal.

Avec le traitement, on peut améliorer la résolution :

- Latérale : migration;
- Verticale : déconvolution.

b) Profondeur de la cible

- Contraste d'impédance acoustique suffisant pour qu'assez d'énergie remonte;
- Puissance de la source :
 - pas trop forte pour ne pas saturer le système d'acquisition;
 - pas trop faible : S/B trop faible.
- Temps d'enregistrement suffisant ($\times 2$ pour la migration).

2^e objectif

Introduction

Objectifs d'un levé

Points particuliers à surveiller

Mise en œuvre

Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage spatial

Format des fichiers de données

Récupération des amplitudes

- Les coûts d'un levé sont fonctions des objectifs :
 - Quatre personnes pour un levé haute-résolution;
 - 40 personnes pour un levé d'exploration pétrolière.
- Exemples :
 - levé 3D de $5 \times 5 \text{ km}^2$: $\sim 1\text{M\$}$;
 - levé 2D : $12\ 000 - 15\ 000\$/\text{km}$.
- Les coûts d'arpentage des lignes et points de tir doivent être considérés.
- Ne pas oublier les coûts de traitement qui représentent environ 10% des coûts d'acquisition;
 - Ce coût peut augmenter pour des traitements avancés.
- L'accès au site et l'obtention de permis peut également occasionner des délais et comporter certains coûts.

Points particuliers à surveiller

Introduction

Objectifs d'un levé

Points particuliers à surveiller

Mise en œuvre

Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage spatial

Format des fichiers de données

Récupération des amplitudes

- Espacement entre les géophones et *aliasing*;
- Longueur d'onde du signal, basée sur une vitesse approximative;
- Nombre de canaux (peut atteindre 30 000);
- Couverture (*Fold*) 2D

$$F = \frac{n_g \Delta g}{2 \Delta s} \quad (1)$$

avec n_g le nombre de géophones, Δg l'intervalle entre géophones et Δs l'intervalle entre les sources;

- Longueur de la ligne : plus longue que la profondeur de la cible la plus profonde;
- Bruits (génératrice, transfo, circulation) : filtre intégré au système;
- Statiques : levé de réfraction ? *uphole statics* ?

Couverture

Introduction

Objectifs d'un levé

Points particuliers à surveiller

Mise en œuvre

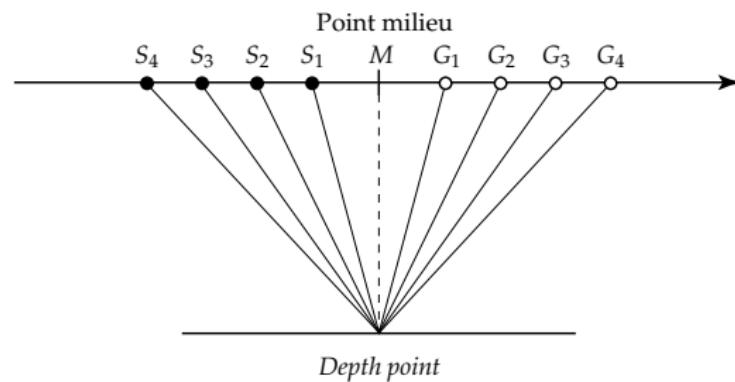
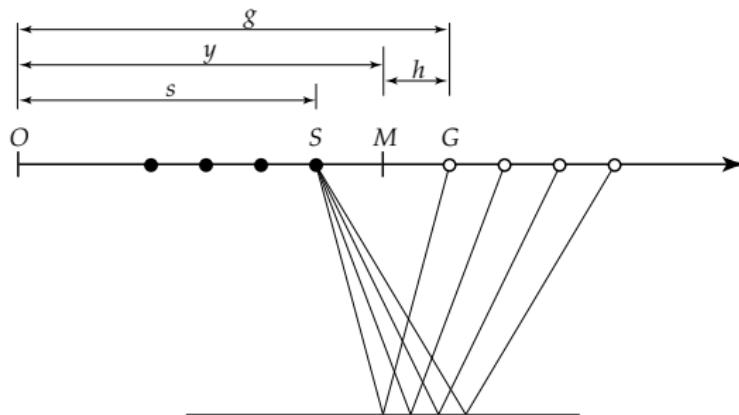
Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage spatial

Format des fichiers de données

Récupération des amplitudes



Couverture

Introduction

Objectifs d'un levé

Points particuliers à surveiller

Mise en œuvre

Équipement

Récepteur sismique

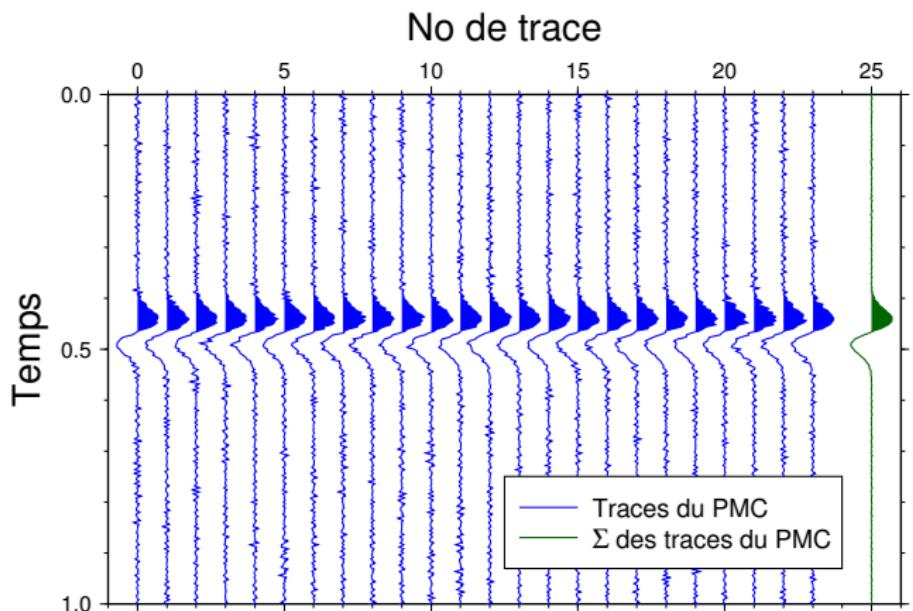
Échantillonnage spatial

Format des fichiers de données

Récupération des amplitudes

- Rapport S/B amélioré sur la trace sommée

- S/B augmente de $n^{1/2}$, où n est le nombre de trace et $n \gg 1$.



Introduction

Mise en œuvre

Configurations

Point milieu commun

Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

Mise en œuvre

Configurations

Introduction
Mise en œuvre
Configurations
Point milieu commun
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage spatial
Format des fichiers de données
Récupération des amplitudes

Levé pétrolier

- grille 3D ou grille constituée de plusieurs profils 2D parallèles;
- $\Delta g = 20 \text{ m}$;
- $\Delta s = 20 \text{ ou } 40 \text{ m}$;
- ≈ 1000 géophones et plus;
- profondeur d'investigation : 1-5 km.

Levé crustal

- un seul long profil 2D (rarement une grille);
- $\Delta g = 50 \text{ m}$;
- $\Delta s = 100 \text{ m}$;
- $\approx 240 \text{ à } 480$ géophones;
- profondeur d'investigation : 30-50 km.

Point milieu commun

Introduction

Mise en œuvre

Configurations

Point milieu commun

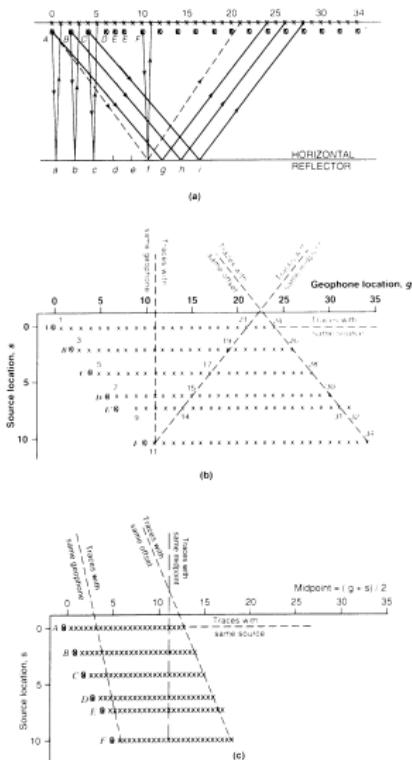
Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes



Principe du *roll-along* :

- on place les géophones en plus grand nombre que le n. de canaux d'enregistrement;
- on tire jusqu'à ce que la source soit au milieu de la flûte de géophones, en enregistrant sur la portion de géophones correspondant à la couverture voulue;
- on déplace ensuite la source et les géophones.

La procédure (et les déviations de la procédure) est consignée dans les notes de terrain, ce qui permet de savoir ce qui a réellement été enregistré.

Point milieu commun

Introduction

Mise en œuvre

Configurations

Point milieu commun

Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

- En général, on garde quelques stations sans géophones (1 à 3) de part et d'autre de la source (*gap*);
 - La proximité de la source fait que l'enregistrement est saturé.

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

Équipement

Géophone

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

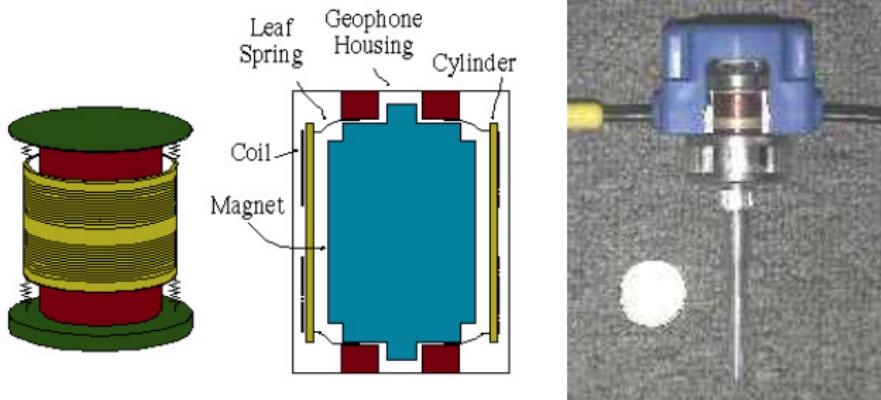
Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

- Une bobine est suspendue à un ressort mobile par rapport à un aimant fixe ;
- lorsque le sol vibre, la bobine produit une force électromotrice ;
- le voltage est proportionnel à la vitesse de déplacement du sol.



Couplage des géophones

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

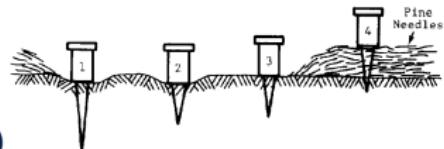
Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

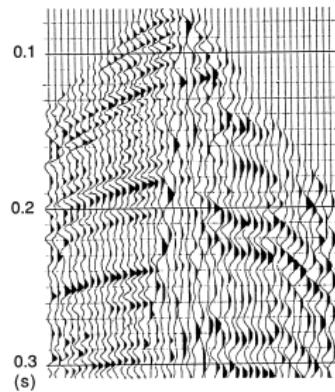
Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

- Le couplage des géophones avec le sol est très important;



- (1 : excellent → 4 : médiocre)



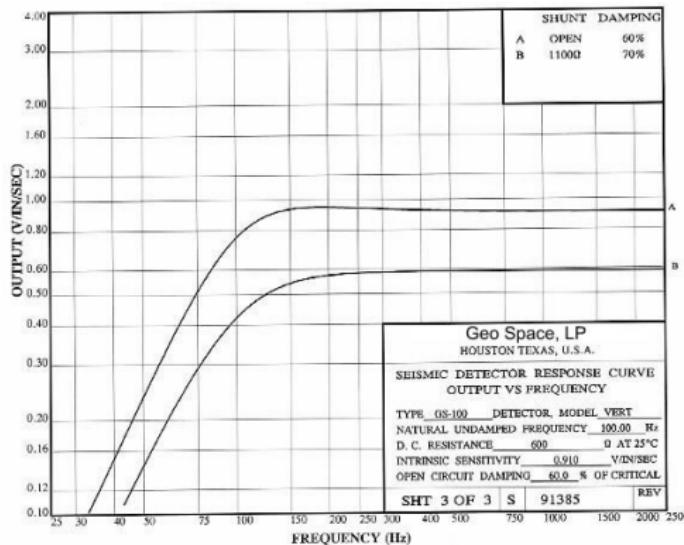
gauche : géophones enterrés, droite : géophones en surface.

Réponse en fréquence des géophones

Introduction
 Mise en œuvre
 Équipement
 Géophone
 Systèmes d'enregistrement
 Sources terrestres
 Sources marines
 Récepteur sismique
 Échantillonnage spatial
 Format des fichiers de données
 Récupération des amplitudes

Le géophone agit comme filtre passe-haut;

- En sismique pétrolière : 4-15 Hz;
- En sismique réflexion de haute résolution : 100-400 Hz;
- En sismique réfraction (échelle crustale) : 1-10 Hz.



Systèmes d'enregistrement

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes



Systèmes d'enregistrement

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes



Sources terrestres

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

① Explosifs : charge placée

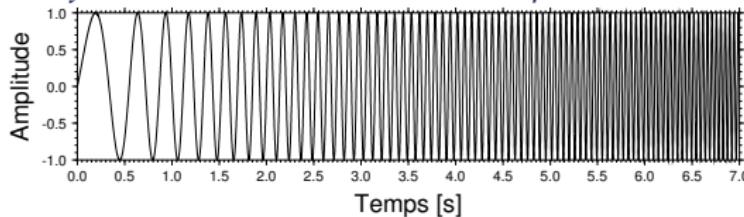
- soit en surface dans un bassin d'eau ;
- soit dans un trou de forage, sous les dépôts meubles.

② Vibroseis

- un signal (*sweep*) $P(t)$ contrôle une plaque sous un camion

$$P(t) = A(t) \sin \left(2\pi t(f_0 + \frac{df}{dt}t) + \theta_0 \right), \quad (2)$$

où $df/dt = \text{cte}$ dans le cas d'un *sweep* linéaire.



- sources ondes S et trois composantes (3C) possibles.

③ Buffalo Gun (cartouche de 12).

④ Impact : masse, chute de poids (*weight dropping*).

Sources terrestres

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

Camion vibroseis



Sources terrestres

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes



Sources terrestres

- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
 - Géophone
 - Systèmes d'enregistrement
- Sources terrestres**
- Sources marines
- Récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes

Camion vibro en action

Sources terrestres

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

Chute de poids



Sources terrestres

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

Chute de poids projeté



Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

Avantages

- spectre blanc, riche en hautes fréquences ;
- peut-être placé dans un forage sous les dépôts meubles
 - meilleur couplage,
 - onde aérienne faible,
 - on peut connaître la vitesse dans les dépôts avec un géophone en surface (*uphole*));
- traitement des données simple (moins coûteux) ;
- premières arrivées utilisables pour le levé de réfraction (corrections statiques) ;

Désavantages

- potentiellement dangereux ;
- potentiellement interdit, difficulté à obtenir un permis ;
- coût et temps de mise en place des forages ;
- le contenu en fréquence n'est pas bien contrôlé ;
- faible rapport S/B dans les environnements bruités.

Vibroseis

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

Avantages

- sécuritaire et peu dommageable (l'énergie est répartie dans le temps);
- le balayage en fréquence peut être adapté à chaque région;
- la forme du spectre en fréquence et le diagramme de rayonnement sont contrôlés;
- bon contrôle de qualité, source reproductible;
- performant dans les environnements bruités;
- souvent moins coûteux que les explosifs.

Désavantages

- requiert une grande expertise;
- difficile de caractériser le mort-terrain;
- génère des ondes aériennes plus importantes;
- peut demander deux levés pour obtenir les haute et basse résolutions.

Chute de poids (projeté)

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

Avantages

- Peu coûteux
- Répétable
- Mobile
- Peu polluant

Désavantages

- Difficile de quantifier l'énergie émise
- Hautes fréquences difficiles à atteindre

Sources marines

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

① Watergun :

- précurseur à l'impulsion principale ;
- riche en hautes fréquences ;
- peu d'énergie, insuffisant pour l'exploration profonde ;
- rarement utilisé de nos jours.

② Airgun :

- impulsion courte ;
- basses fréquences dominantes ;
- beaucoup d'énergie ;
- un seul *airgun* génère plusieurs oscillations : on utilise un groupe de plusieurs *airguns* de différentes puissances pour réduire les oscillations secondaires par interférence destructive.

Sources marines

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

Air gun



Sources marines

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

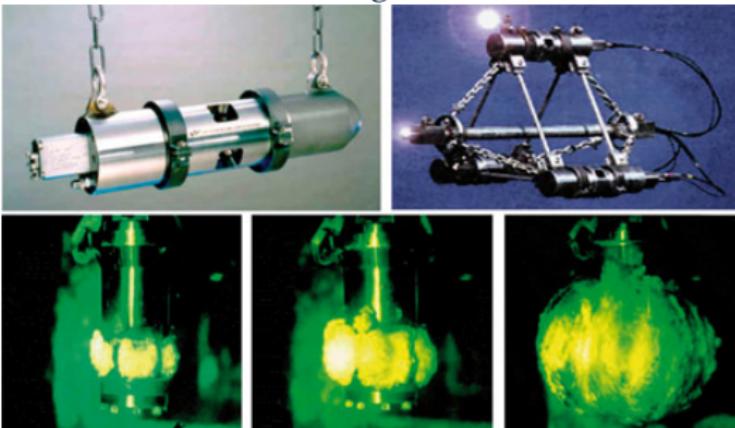
Récepteur sismique

Échantillonage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

Air gun



Navires sismiques

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Géophone

Systèmes
d'enregistrement

Sources terrestres

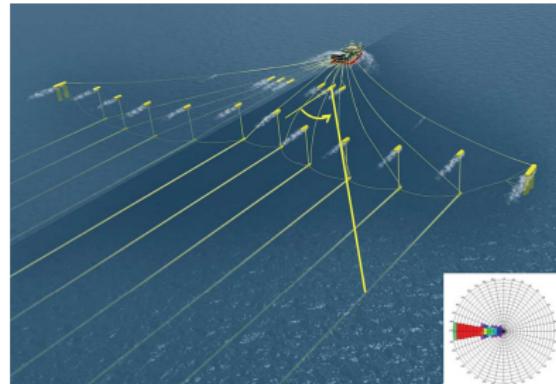
Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes



Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Récepteur sismique

Principe

Réponse d'un récepteur
sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

Récepteur sismique

Récepteur sismique – Principe

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Récepteur sismique

Principe

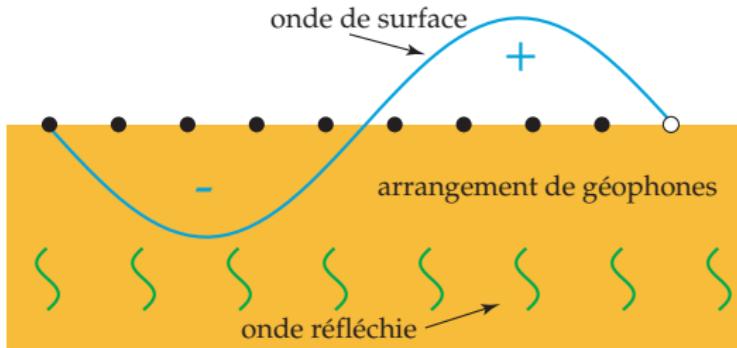
Réponse d'un récepteur
sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

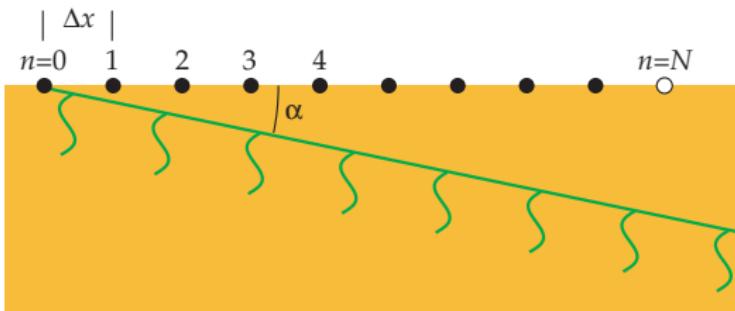
Récupération des
amplitudes

- Les ondes de surface (*ground roll*) nuisent à l'interprétation des ondes réfléchies ;
- En sommant les signaux d'un arrangement de géophones (*array*) disposés judicieusement,
 - on peut réduire considérablement l'onde de surface ;
 - on rehausse le signal recherché.



Réponse d'un récepteur sismique

Introduction
 Mise en œuvre
 Équipement
 Récepteur sismique
 Principe
 Réponse d'un récepteur sismique
 Échantillonnage spatial
 Format des fichiers de données
 Récupération des amplitudes



Soit une onde harmonique $A \sin \omega t$, incidente au géophone 0 avec une vitesse V ;

- au n^e géophone, l'onde arrive à $t + n\Delta t$, où $\Delta t = (\Delta x \sin \alpha) / V$;
- le signal à ce géophone est $A \sin \omega(t - n\Delta t) = A \sin(\omega t - n\gamma)$, où γ est le déphasage entre deux géophones successifs;

Réponse d'un récepteur sismique

- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
- Récepteur sismique
- Principe
- Réponse d'un récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes

- le déphasage vaut

$$\begin{aligned}\gamma &= \omega\Delta t = 2\pi f(\Delta x \sin \alpha) / V = (2\pi\Delta x / \lambda) \sin \alpha \\ &= 2\pi\Delta x / \lambda_a,\end{aligned}$$

où $\lambda_a = \lambda / \sin \alpha$ est la longueur d'onde *apparente*;

- le signal de sortie du récepteur sismique est la somme des signaux aux N géophones :

$$\begin{aligned}h(t) &= \sum_{n=0}^{N-1} A \sin(\omega t - n\gamma) \\ &= A \left[\frac{\sin(N\gamma/2)}{\sin(\gamma/2)} \right] \sin \left[\omega t - \frac{(N-1)\gamma}{2} \right].\end{aligned}$$

Réponse d'un récepteur sismique

- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
- Récepteur sismique
 - Principe
 - Réponse d'un récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes

La réponse d'un récepteur sismique F est définie

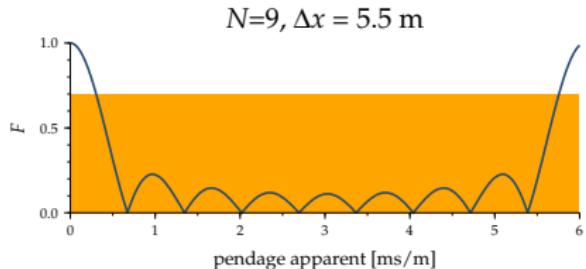
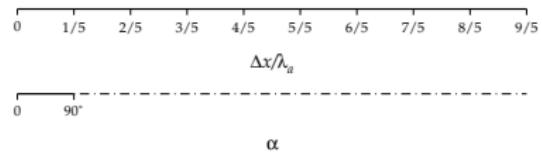
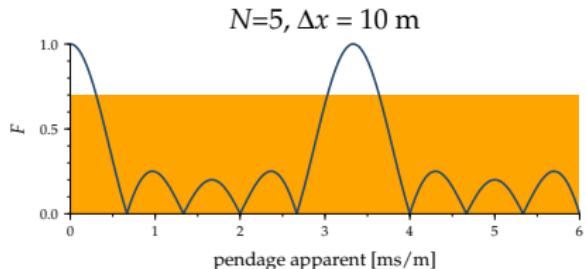
$$\begin{aligned} F &= \frac{\text{amplitude de } h(t)}{NA} \\ &= \left| \frac{\sin(N\gamma/2)}{N \sin(\gamma/2)} \right| \\ &= \left| \frac{\sin[N\pi(\Delta x/\lambda) \sin \alpha]}{N \sin[\pi(\Delta x/\lambda) \sin \alpha]} \right| \end{aligned}$$

Réponse d'un récepteur sismique

Introduction
 Mise en œuvre
 Équipement
 Récepteur sismique
 Principe
 Réponse d'un récepteur
 sismique
 Échantillonnage
 spatial
 Format des fichiers
 de données
 Récupération des
 amplitudes

Définitions :

- longueur effective : $N\Delta x$;
- pendage apparent : $\Delta t/\Delta x = (\sin \alpha)/V$;
- *reject region* : région pour laquelle $F < 0.7$.



Réponse d'un récepteur sismique

- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
- Récepteur sismique
 - Principe
 - Réponse d'un récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes

Sur le terrain, la réponse du récepteur sismique diffère de la réponse théorique :

- espacement pas exactement constant entre les géophones;
- variation topographiques;
- épaisseur variable du mort-terrain;
- variation de composition et/ou de compactage à la surface.

Le récepteur sismique est néanmoins très utile.

Réponse d'un récepteur sismique

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Récepteur sismique

Principe

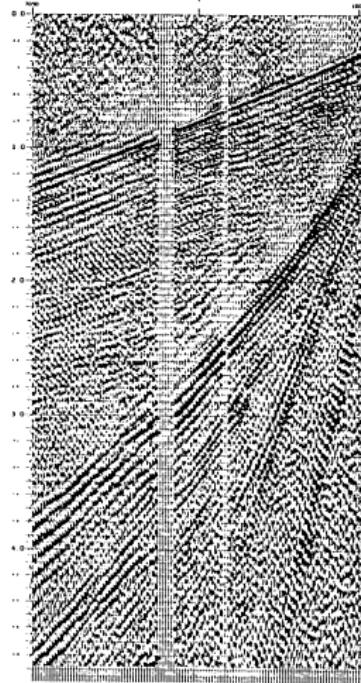
Réponse d'un récepteur
sismique

Échantillonnage
spatial

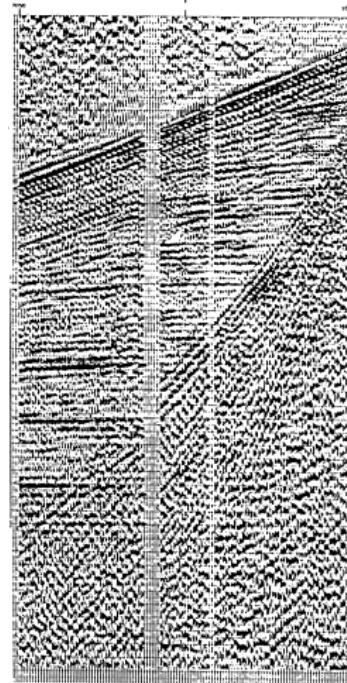
Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

géophones indépendants



Récepteurs sismiques



Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
**Échantillonnage
spatial**
Format des fichiers
de données
Récupération des
amplitudes

Échantillonnage spatial

Échantillonnage spatial

- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
- Récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes

Pour éviter les ambiguïtés dues à l'*aliasing*, il faut que la distance maximale d_{max} entre deux récepteurs soit

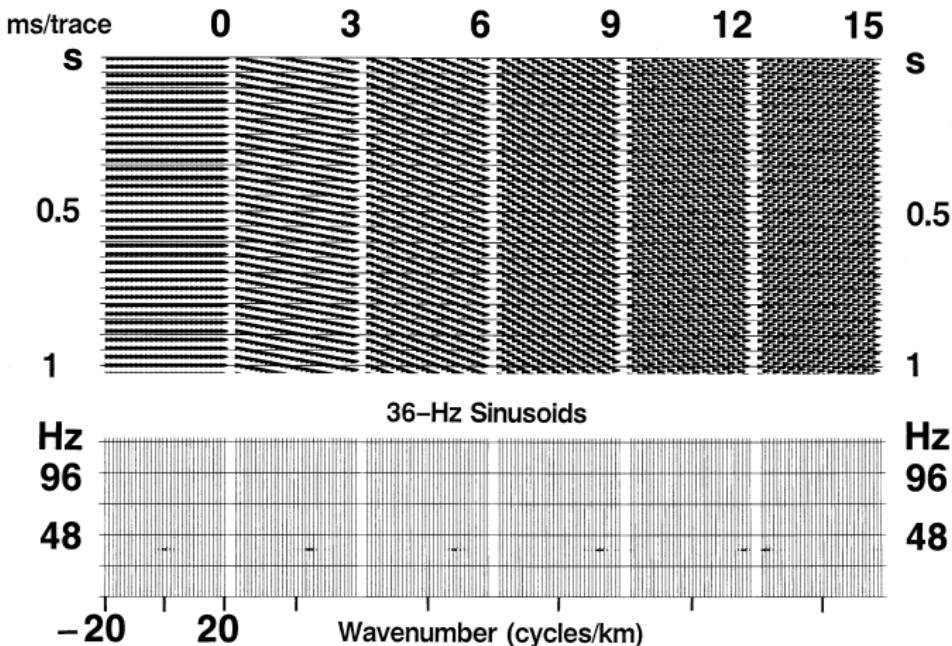
$$\begin{aligned} d_{max} &\leq \frac{(\lambda_a)_{min}}{2} = \frac{\lambda_{min}}{2 \sin \alpha_{max}} \\ &\leq \frac{V/f_{max}}{2 \sin \alpha_{max}} = \frac{V/f_{max}}{2V(\Delta t/\Delta x)_{max}} \\ &\leq \frac{1}{2f_{max}(\Delta t/\Delta x)_{max}}. \end{aligned}$$

$(\Delta t/\Delta x)_{max}$ correspond au pendage maximal des réflecteurs. Dans la réalité, on se donne un facteur de sécurité :

$$d_{max} \leq \frac{1}{3f_{max}(\Delta t/\Delta x)_{max}}.$$

Échantillonnage spatial

- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
- Récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes



Paramètres optimaux

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

Les règles suivantes sont le fruit de la théorie et de l'expérience

- Le déport maximal doit être à peu près égal à la profondeur du réflecteur d'intérêt le plus profond, ce qui permet d'obtenir une courbure d'indicatrice (NMO) suffisante pour distinguer les arrivées primaires des multiples tout en évitant les erreurs faites avec les approximations courantes de l'équation de la NMO.
- Le déport minimal ne doit pas excéder la profondeur du réflecteur d'intérêt le moins profond. Les problèmes de bruit ou saturation peuvent cependant faire en sorte de l'on choisisse un déport plus important.

Paramètres optimaux

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

- La longueur maximale du récepteur sismique ne doit pas excéder la longueur d'onde apparente minimale de l'onde réfléchie.
- L'écartement minimal entre les géophones (à l'intérieur du récepteur sismique) doit être inférieur à la longueur d'onde apparente du bruit, qui correspond généralement à l'onde ayant la vitesse la plus faible (*ground roll*).
- L'écartement maximal entre les récepteurs sismiques ne doit pas excéder le double de la résolution horizontale voulue à la profondeur d'intérêt.

Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage
spatial
Format des fichiers
de données
Récupération des
amplitudes

Format des fichiers de données

Données de terrain

Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage spatial
Format des fichiers de données
Récupération des amplitudes

- Les données de terrain sont constituées de :
 - ➊ les enregistrements;
 - ➋ le levé topographique (points source & récepteurs);
 - ➌ le journal de l'opérateur (*observer's log*).
- La SEG (*Society of Exploration Geophysicists*) a développé des standards pour uniformiser les formats et faciliter les échanges de données (voir le site <http://www.seg.org>);
- Actuellement, les standards utilisés par l'industrie pour les items 1 et 2 sont respectivement les formats SEG-D et SEG-P;
 - Ces formats ont été révisés au cours du temps, par exemple, le format SEG-D le plus récent est SEG-D rev. 3
- L'item 3 est généralement fourni en format ASCII ou excel.

Le format SEG-Y

Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage spatial
Format des fichiers de données
Récupération des amplitudes

- Une fois les données éditées (topographie associée aux points de tirs et récepteurs, données erronées exclues), ou bien après sommation (données *poststack*), elles sont habituellement sauvegardées en format SEG-Y.
- Le format SEG-Y (rev. 1) comporte :
 - une entête de fichier en format texte;
 - une entête de fichier en format binaire;
 - N entêtes de fichier optionnelles en format texte;
 - M entêtes de trace en format binaire, une pour chaque trace;
 - M blocs de données en format binaire, un pour chaque trace.
- En principe, ce format est auto suffisant : toutes les informations requises pour le traitement ou l'interprétation sont incluses dans le fichier.

Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage
spatial
Format des fichiers
de données
Récupération des
amplitudes

Récupération des amplitudes

Séquence de traitement type

Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage spatial
Format des fichiers de données
Récupération des amplitudes

- ① Récupération des amplitudes & divergence géométrique;
- ② Déconvolution avant sommation;
- ③ Corrections statiques (levés terrestres);
- ④ Regroupement des traces en point milieu commun;
- ⑤ Analyse de vitesse et corrections dynamiques;
- ⑥ Sommation;
- ⑦ Déconvolution après sommation;
- ⑧ Migration;
- ⑨ Filtrage & gain.

Correction de la divergence géométrique

Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage spatial
Format des fichiers de données
Récupération des amplitudes

- L'amplitude des réflexions est fonction du contraste d'impédance acoustique ($Z = \rho v$);
- Or, l'amplitude du signal mesuré dépend
 - de la divergence géométrique;
 - de l'atténuation intrinsèque dans le matériau qui cause une perte graduelle des hautes fréquences en fonction du temps.
- Pour pouvoir déterminer les contrastes de Z et caractériser les structures géologiques, il faut éliminer les effets précédents.

Correction de la divergence géométrique

Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage spatial
Format des fichiers de données
Récupération des amplitudes

● Divergence géométrique :

- Dans un milieu homogène, l'intensité décroît en $1/r^2$, et l'amplitude en $1/r$;
- Dans un sol stratifié, on peut faire l'approximation d'une décroissance en

$$\frac{1}{v^2(t) t}$$

où $v(t)$ est la vitesse RMS.

- La fonction de gain à appliquer est

$$g(t) = \frac{v^2(t) t}{v_0^2 t_0}, \quad (3)$$

où v_0 est une vitesse de référence au temps t_0 .

- Il est possible de définir des fonctions plus précises tenant compte du déport source-récepteur.

Correction de la divergence géométrique

Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage spatial
Format des fichiers de données
Récupération des amplitudes

- En présence d'un grand nombre de réflecteurs, la fonction (3) peut sur-compenser la divergence;
- On peut alors appliquer la fonction

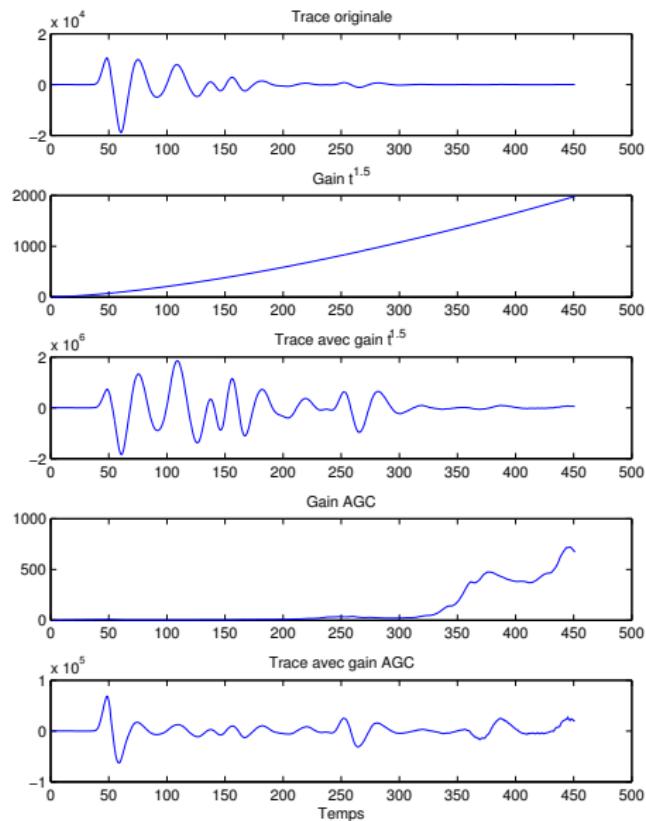
$$g(t) = t^\alpha, \quad (4)$$

où α est généralement fixé à 1.5 ou 2.

- Notes :
 - les fonctions (3) et (4) ne corrigent pas l'atténuation intrinsèque (perte des hautes fréquences);
 - le bruit dans les données est rehaussé.

Correction de la divergence géométrique

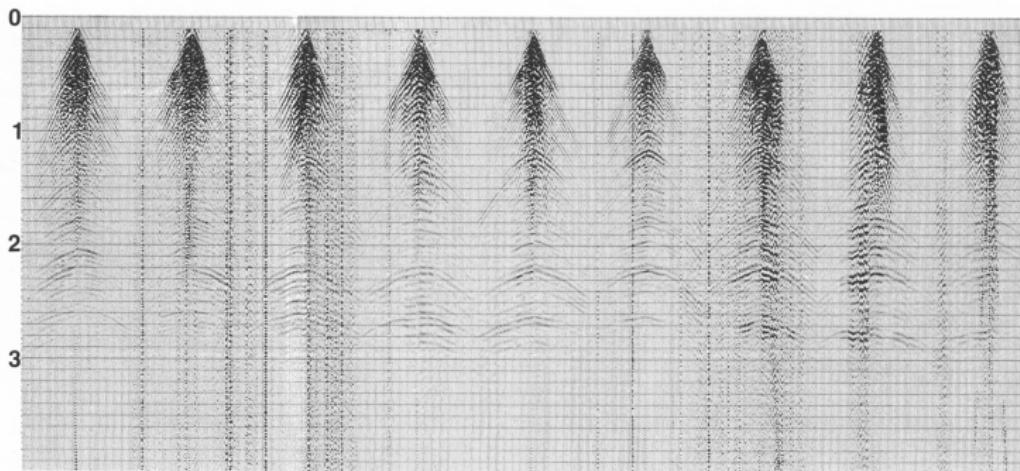
- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
- Récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes



Correction de la divergence géométrique

Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage spatial
Format des fichiers de données
Récupération des amplitudes

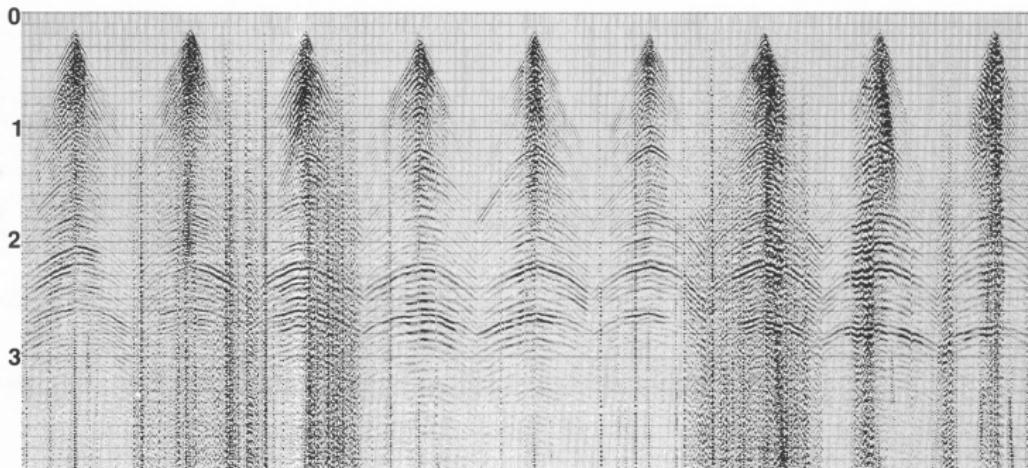
Sans correction



Correction de la divergence géométrique

- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
- Récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes

Avec correction



Gain AGC

- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
- Récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes

- En imagerie sismique, on peut être intéressé à faire ressortir les réflecteurs sans égard pour l'intensité de la réflexion ;
- Une fonction gain qui rehausse les réflexions indépendamment les unes des autres est alors souhaitable ;
- Le gain ACG (*Automatic gain control*) remplit cette fonction ;
- Ce type de gain est appliqué sur une fenêtre coulissante d'une longueur prescrite, i.e.

$$g(t) = \frac{\text{amplitude rms voulue}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|},$$

où

- $g(t)$ est la fonction gain,
- x_i est l'amplitude de la trace,
- N est le nombre de points à l'intérieur de la fenêtre.

Gain AGC

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

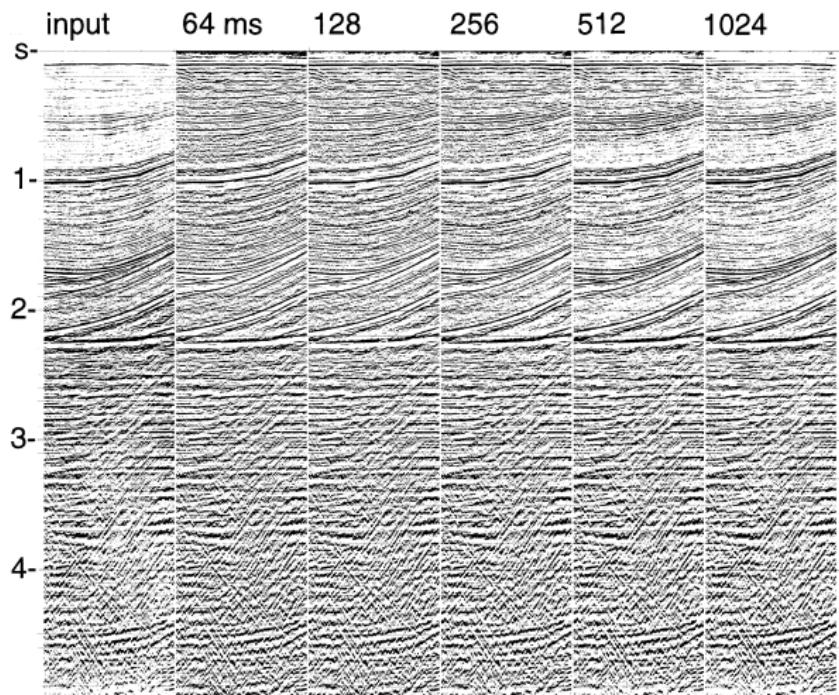
Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

Gain ACG – influence de la longueur de fenêtre



Inverse Q filtering

Introduction

Mise en œuvre

Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage
spatial

Format des fichiers
de données

Récupération des
amplitudes

- On peut écrire l'équation d'une trace sismique comme celle d'une onde se propageant verticalement à une vitesse v

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}$$

- On résout cette équation en passant dans le domaine de Fourier

$$\frac{\omega^2}{v^2} P = \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}$$

et la solution est

$$P(\omega, z) = P(\omega, z = 0) \exp\left(-i \frac{\omega}{v} z\right).$$

- On peut inclure l'atténuation de l'onde en considérant une vitesse complexe, $v = \alpha + i\beta$, où la partie complexe « cause » l'atténuation.

Inverse Q filtering

- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
- Récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes

- Après quelques manipulations, on arrive à

$$P(\omega, z) = P(\omega, z = 0) \exp\left(-i \frac{\omega \alpha}{\alpha^2 + \beta^2} z\right) \exp\left(-\frac{\omega \beta}{\alpha^2 + \beta^2} z\right)$$

- Pour la majorité des roches, $\beta \ll \alpha$, ce qui permet d'écrire

$$P(\omega, z) = P(\omega, z = 0) \exp\left(-i \frac{\omega}{\alpha} z\right) \exp\left(-\frac{\omega \beta}{\alpha^2} z\right)$$

- On définit une variable temporelle τ liée à la profondeur z par $z = \alpha \tau$, ce qui permet d'écrire

$$P(\omega, \tau) = P(\omega, \tau = 0) \exp(-i \omega \tau) \exp\left(-\omega \frac{\beta}{\alpha} \tau\right)$$

Inverse Q filtering

- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
- Récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes

- On insère maintenant le facteur de qualité Q défini ici par

$$\frac{1}{2Q} = \frac{\beta}{\alpha}$$

ce qui nous donne

$$P(\omega, \tau) = P(\omega, \tau = 0) \exp(-i\omega\tau) \underbrace{\exp\left(-\frac{\omega\tau}{2Q}\right)}_{\text{atténuation}} \quad (5)$$

- Un filtre $W(\omega, \tau)$ de spectre d'amplitude

$$A(\omega, \tau) = \exp\left(\frac{\omega\tau}{2Q}\right)$$

permet de corriger l'atténuation (remarquez le signe de l'exponentielle).

Inverse Q filtering

Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage spatial
Format des fichiers de données
Récupération des amplitudes

- On obtient la phase ϕ du filtre à partir de la transformée de Hilbert (notée \mathcal{H}) de $A(\omega, \tau)$:

$$W(\omega, \tau) = A(\omega, \tau) \exp\{-i\phi(\omega, \tau)\}$$

avec

$$\phi(\omega, \tau) = \mathcal{H}\{A(\omega, \tau)\}.$$

- L'équation (5) devient

$$P(\omega, \tau) = P(\omega, \tau = 0) \exp(-i\omega\tau) W(\omega, \tau).$$

Inverse Q filtering

Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage spatial
Format des fichiers de données
Récupération des amplitudes

- L'application du filtre sur une trace réelle de n échantillons est faite de façon récursive;
- Il faut d'abord définir un pas $\Delta\tau$ et appliquer

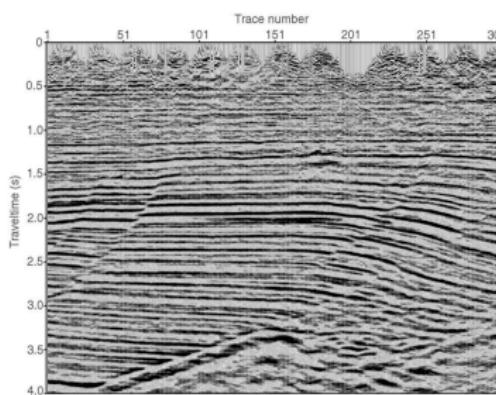
$$P(\omega, k\Delta\tau) = P(\omega, (k - 1)\Delta\tau) \exp(-i\omega\Delta\tau) W(\omega, \Delta\tau)$$

pour $k = 1, 2, \dots, n.$

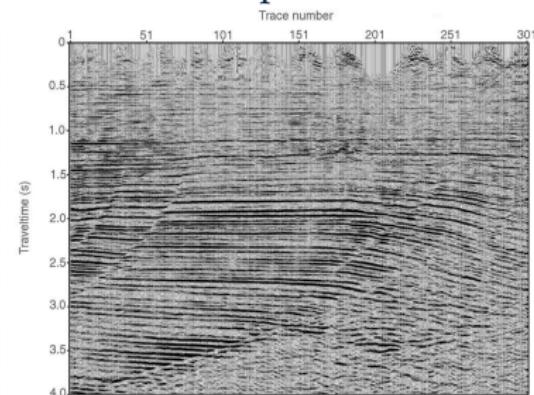
Inverse Q filtering

- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
- Récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes

Avant



Après



Inverse Q filtering

Introduction
Mise en œuvre
Équipement
Récepteur sismique
Échantillonnage spatial
Format des fichiers de données
Récupération des amplitudes

