

## **GEO1303 – Méthodes sismiques**

### **3 - Planification & design des levés de sismique réflexion terrestre**

Bernard Giroux  
[\(bernard.giroux@ete.inrs.ca\)](mailto:bernard.giroux@ete.inrs.ca)

Institut national de la recherche scientifique  
Centre Eau Terre Environnement

Version 1.0.12  
Automne 2020

**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

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

# 1<sup>er</sup> 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<sup>e</sup> 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\$/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,  $\Delta g$  l'intervalle entre géophones et  $\Delta s$  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

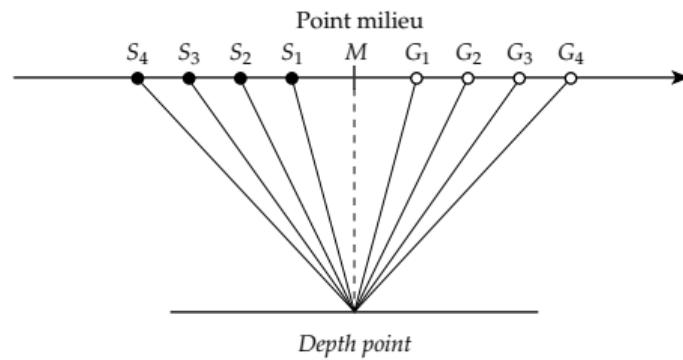
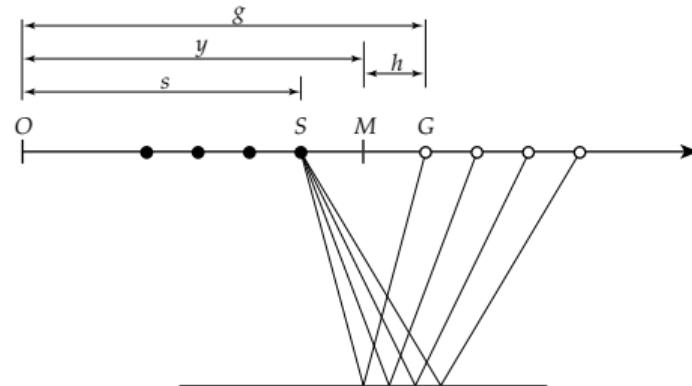
Équipement

Récepteur sismique

Échantillonnage spatial

Format des fichiers de données

Récupération des amplitudes

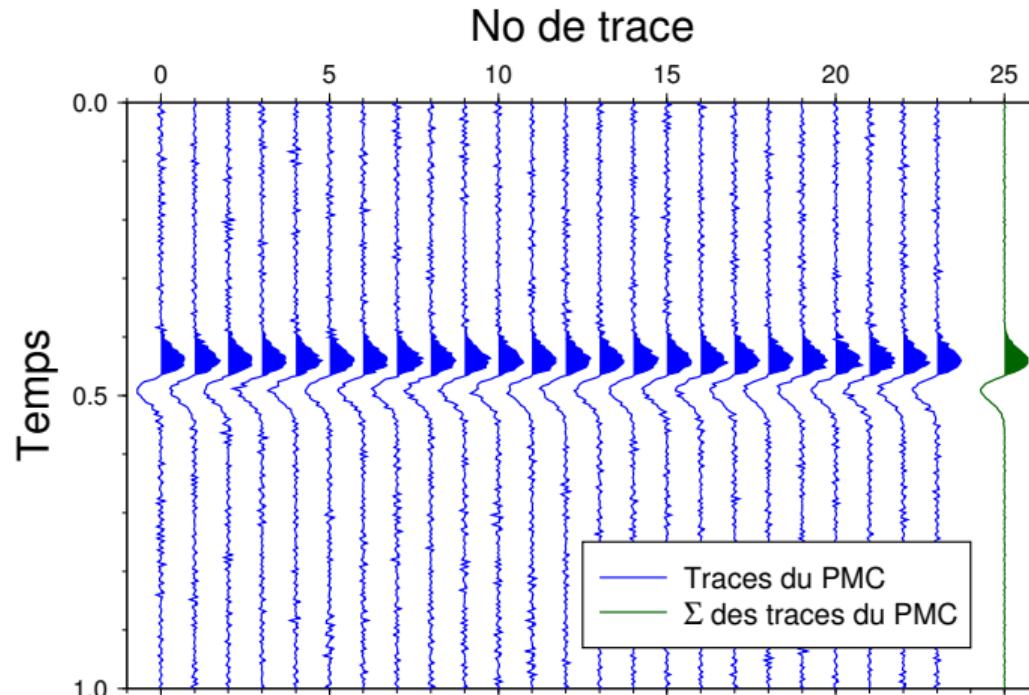


# Couverture

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;
- $\Delta g = 20 \text{ m}$ ;
- $\Delta s = 20 \text{ ou } 40 \text{ m}$ ;
- $\approx 1000$  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.

## Configurations

## Introduction

## Mise en œuvre

## Configurations

#### Point milieu commun

## Équipement

## Récepteur sismique

## Échantillonnage spatial

## Format des fichiers de données

## Récupération des amplitudes



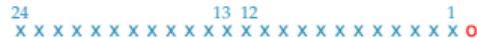
### *split-dip spreads*



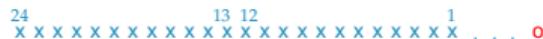
### *Gapped split*



### *End-on spread*



### *In-line offset*



### *Asymmetric*



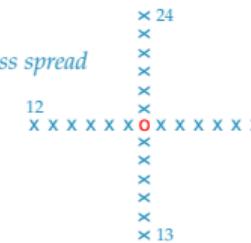
Broadside-T

Broadside-T



Broadside-L

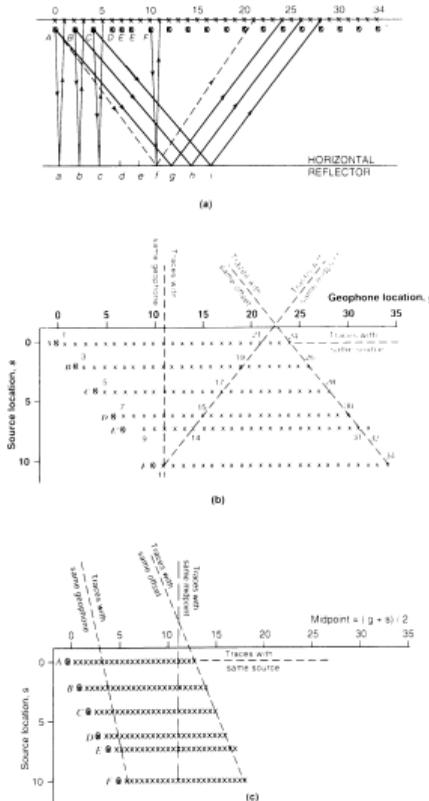
### *Cross spread*



- o source
- x géophon

# 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.
- Pour les levés terrestres, on fait du *roll-on–roll-off* pour atteindre une couverture complète.
  - Roll-on/off : on commence à tirer avant que tout les géophones soient en place, mais dès que la couverture est atteinte pour la portion proche de la source.
  - Il faut disposer d'un nombre de capteur plus grand que la courverture recherchée.

Introduction

Mise en œuvre

## Équipement

Géophone

Systèmes  
d'enregistrement

Sources terrestres

Sources marines

Récepteur sismique

Échantillonnage  
spatial

Format des fichiers  
de données

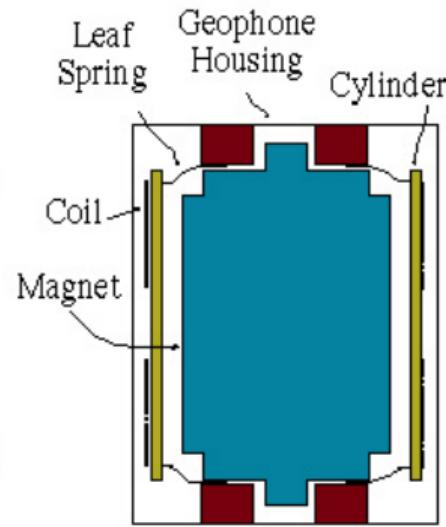
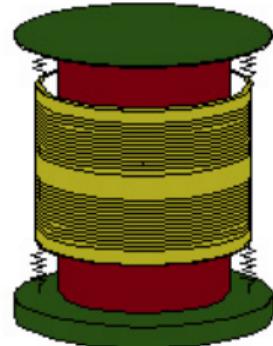
Récupération des  
amplitudes

# 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

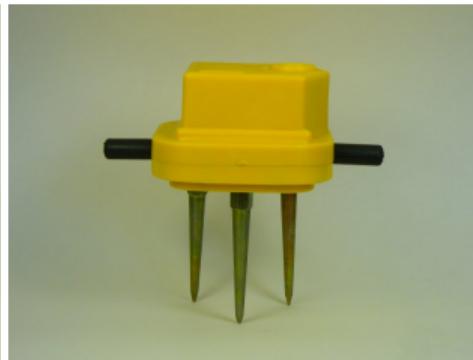
- Une bobine est suspendue à un ressort mobile par rapport à un aimant fixe;
- lorsque le sol vibre, la bobine produit une force électromotrice;
- le voltage est proportionnel à la vitesse de déplacement du sol.



# Géophones triaxiaux

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

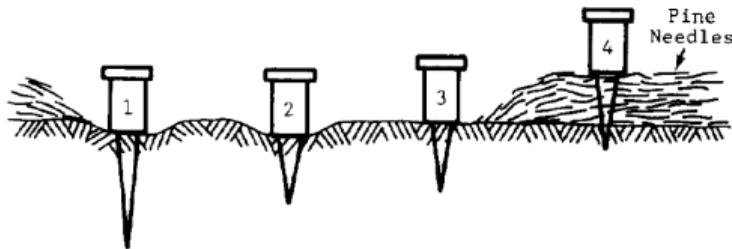
- Pour les levés visant à mesurer les ondes S, il faut des géophones triaxiaux.



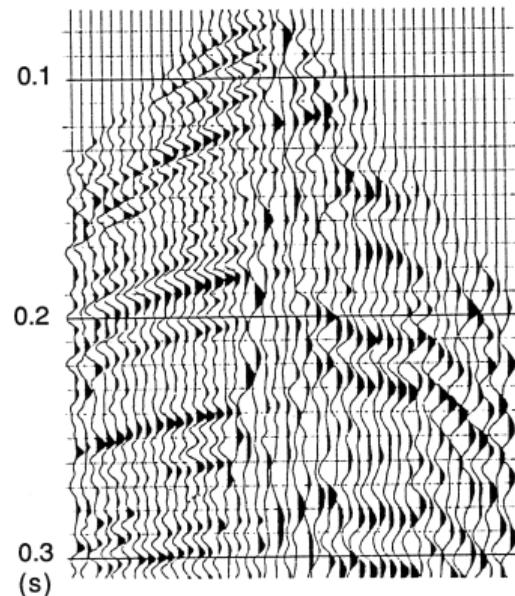
# Couplage des géophones

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)



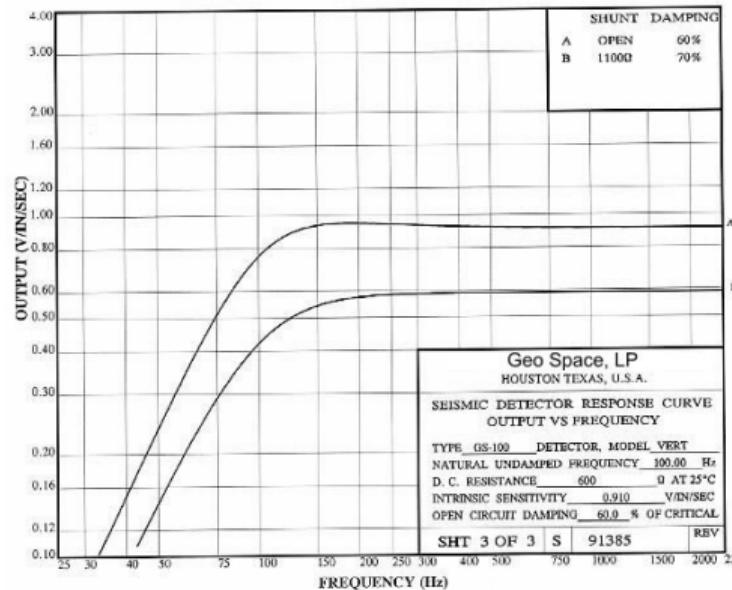
gauche : géophones enterrés,  
droite : géophones en surface.

# 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



# 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

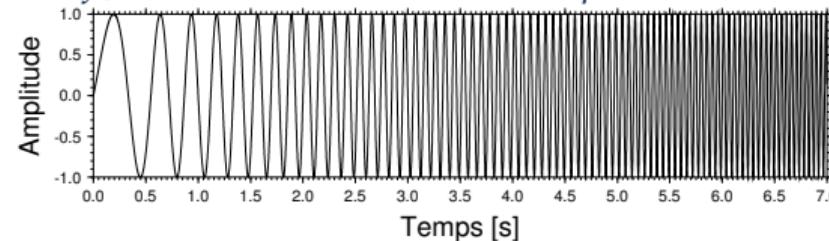
- soit en surface dans un bassin d'eau ;
- soit dans un trou de forage, sous les dépôts meubles.

## 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
- Échantillonnage 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



# Explosifs

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

- 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

Échantillonnage  
spatial

Format des fichiers  
de données

Récupération des  
amplitudes

## ➊ Watergun :

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

## ➋ 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
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes

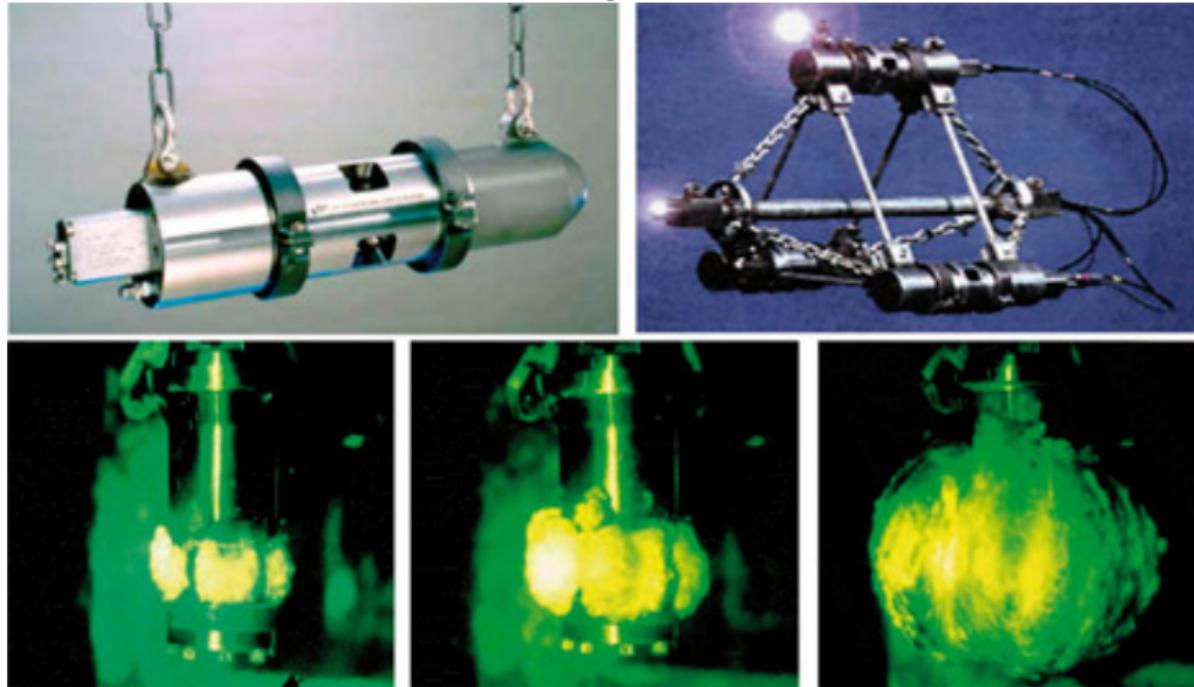
*Air gun*



# Sources marines

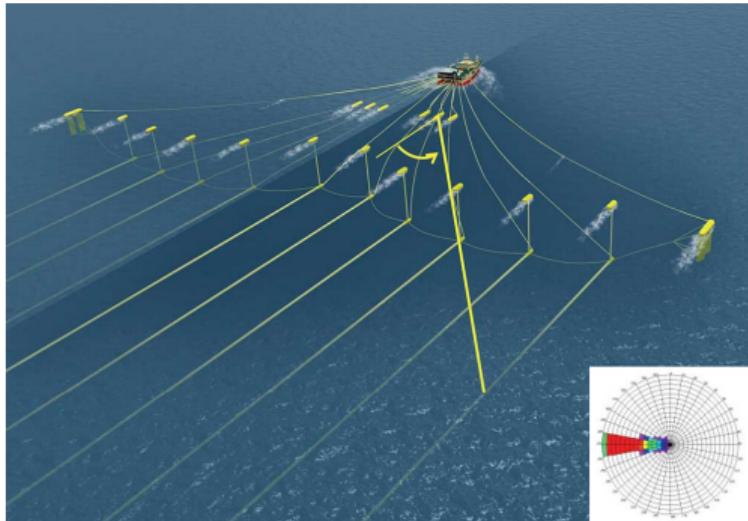
Introduction  
Mise en œuvre  
Équipement  
Géophone  
Systèmes  
d'enregistrement  
Sources terrestres  
Sources marines  
  
Récepteur sismique  
Échantillonnage  
spatial  
  
Format des fichiers  
de données  
  
Récupération des  
amplitudes

*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



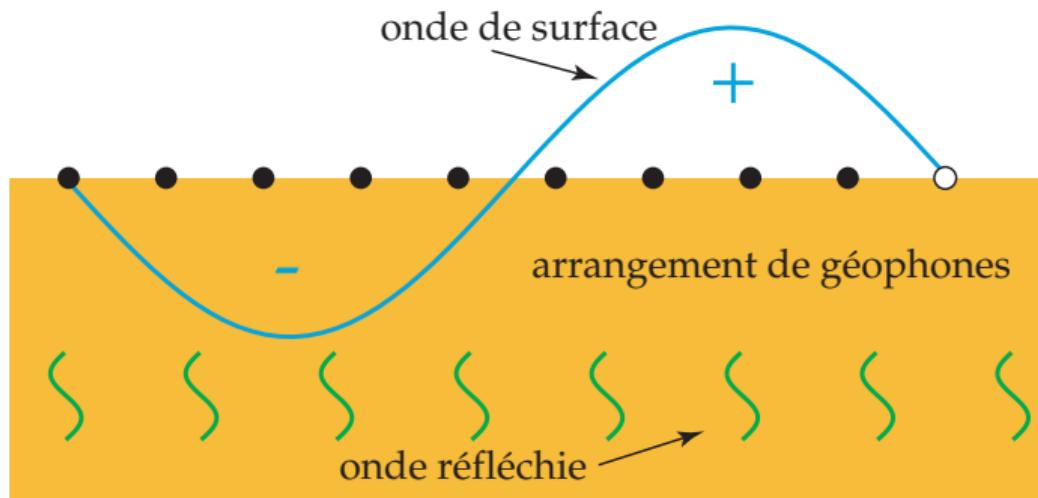
Introduction  
Mise en œuvre  
Équipement  
**Récepteur sismique**  
Principe  
Réponse d'un récepteur  
sismique  
Échantillonnage  
spatial  
Format des fichiers  
de données  
Récupération des  
amplitudes

# Récepteur sismique

# Récepteur sismique – Principe

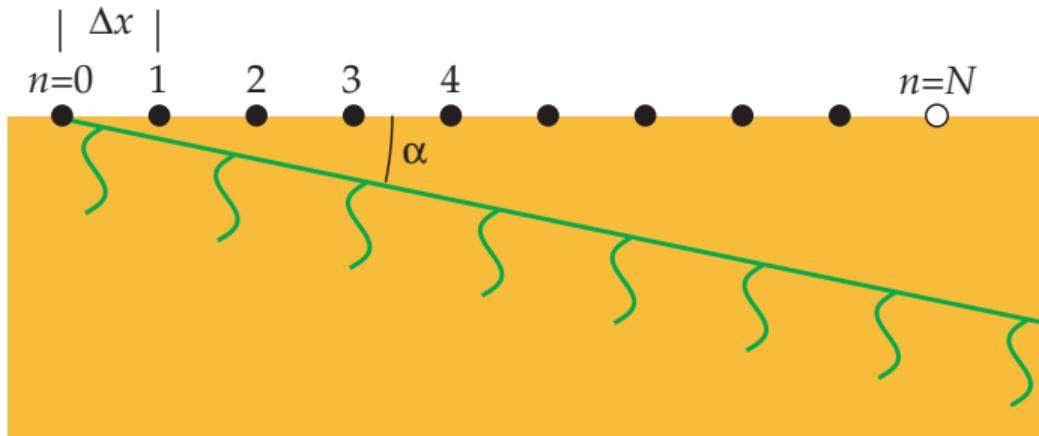
Introduction  
Mise en œuvre  
Équipement  
Récepteur sismique  
Principe  
Réponse d'un récepteur  
sismique  
Échantillonnage  
spatial  
Format des fichiers  
de données  
Récupération des  
amplitudes

- 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  $\gamma$  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

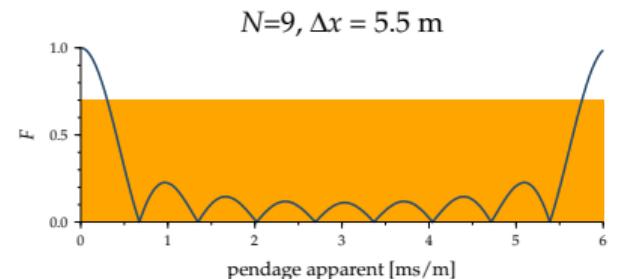
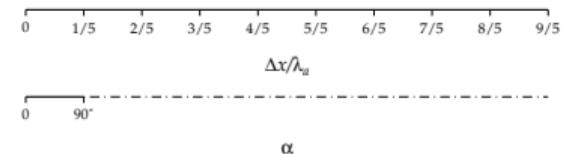
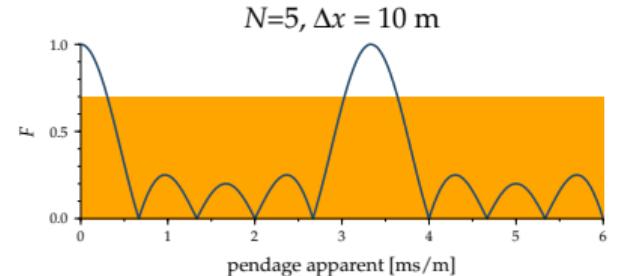
$$\begin{aligned} F &= \frac{\text{amplitude de } h(t)}{NA} \\ &= \left| \frac{\sin(N\gamma/2)}{N \sin(\gamma/2)} \right| \\ &= \left| \frac{\sin[N\pi(\Delta x/\lambda) \sin \alpha]}{N \sin[\pi(\Delta x/\lambda) \sin \alpha]} \right| \end{aligned}$$

# 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 :

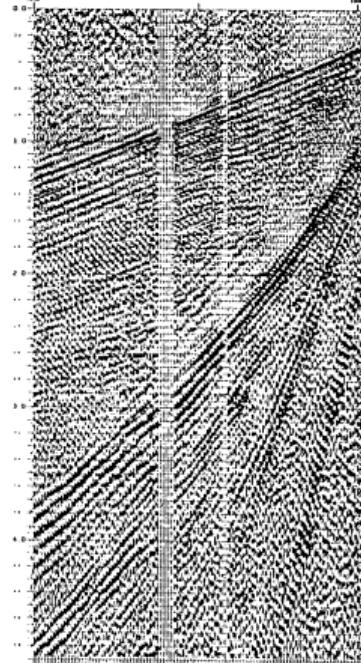
- espacement pas exactement constant entre les géophones;
- variation topographiques;
- épaisseur variable du mort-terrain;
- variation de composition et/ou de compactage à la surface.

Le récepteur sismique est néanmoins très utile.

# Réponse d'un récepteur sismique

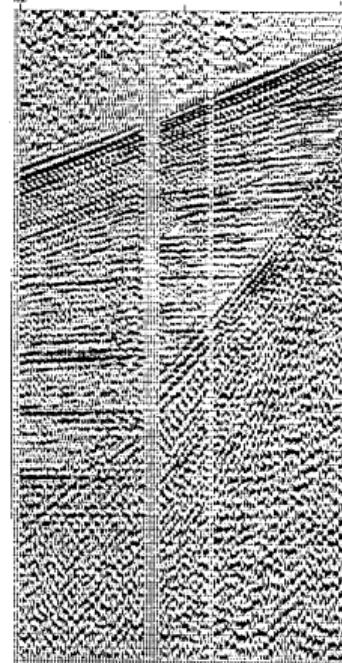
- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
- Récepteur sismique
  - Principe
  - Réponse d'un récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes

géophones indépendants



(a)

Récepteurs sismiques



(b)

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

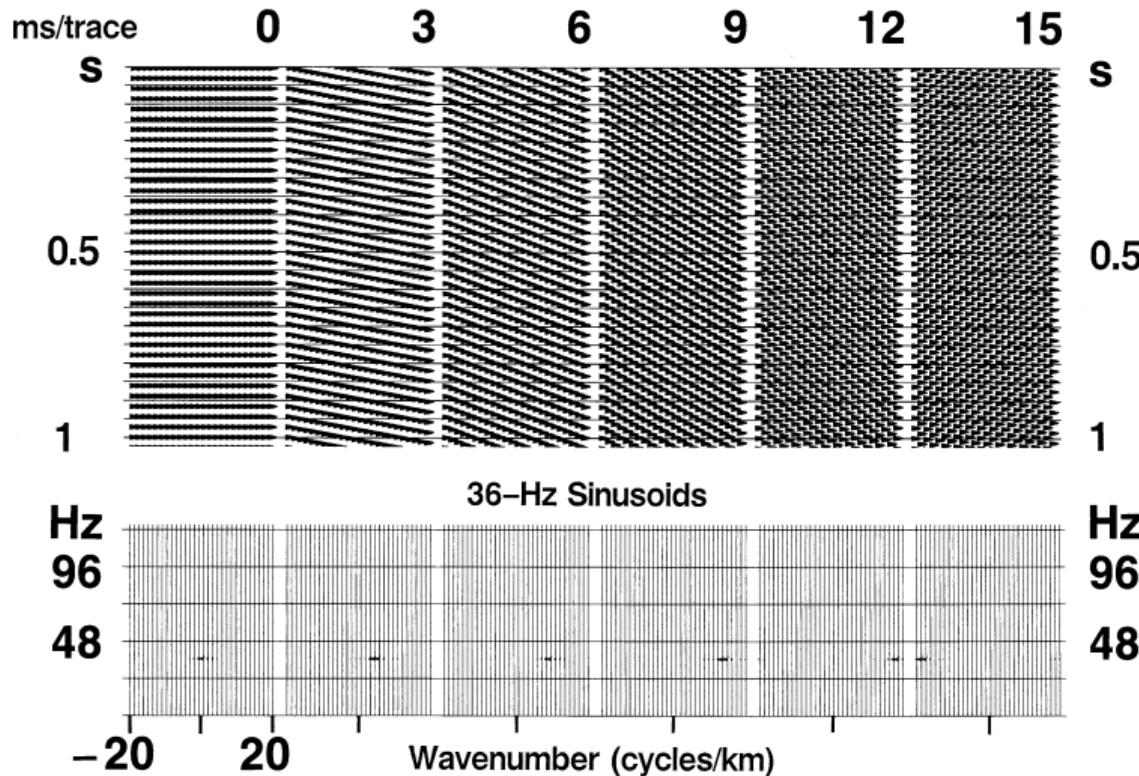
$$\begin{aligned} d_{max} &\leq \frac{(\lambda_a)_{min}}{2} = \frac{\lambda_{min}}{2 \sin \alpha_{max}} \\ &\leq \frac{V/f_{max}}{2 \sin \alpha_{max}} = \frac{V/f_{max}}{2V(\Delta t/\Delta x)_{max}} \\ &\leq \frac{1}{2f_{max}(\Delta t/\Delta x)_{max}}. \end{aligned}$$

$(\Delta t/\Delta x)_{max}$  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 :
  - 1 les enregistrements;
  - 2 le levé topographique (points source & récepteurs);
  - 3 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

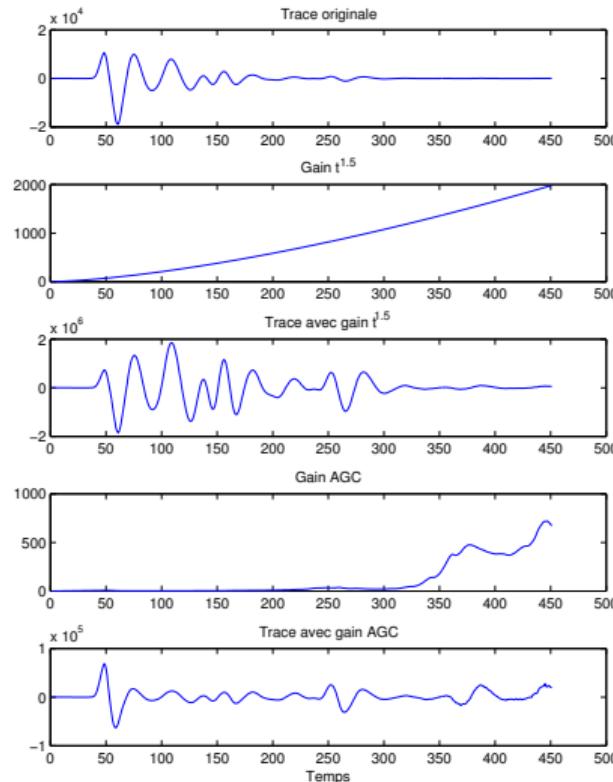
$$g(t) = t^\alpha, \quad (4)$$

où  $\alpha$  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

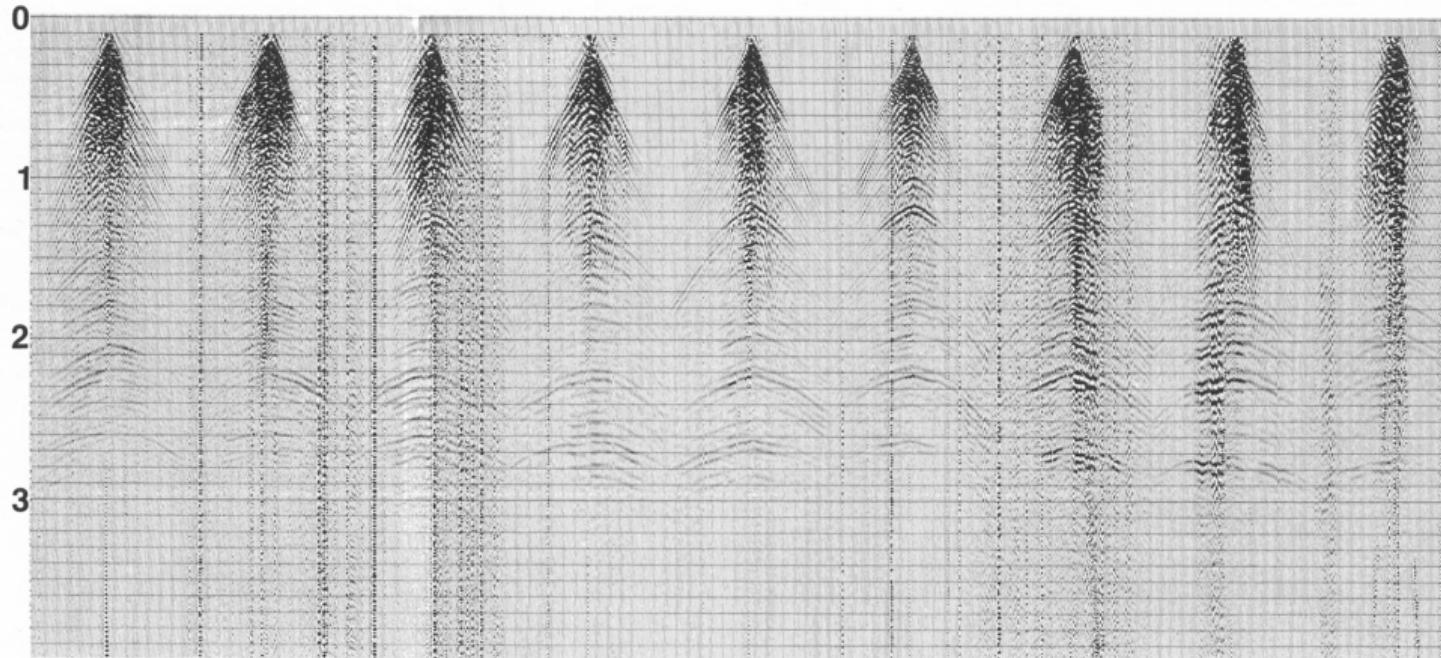
- Introduction
- Mise en œuvre
- Équipement
- Récepteur sismique
- Échantillonnage spatial
- Format des fichiers de données
- Récupération des amplitudes



# Correction de la divergence géométrique

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

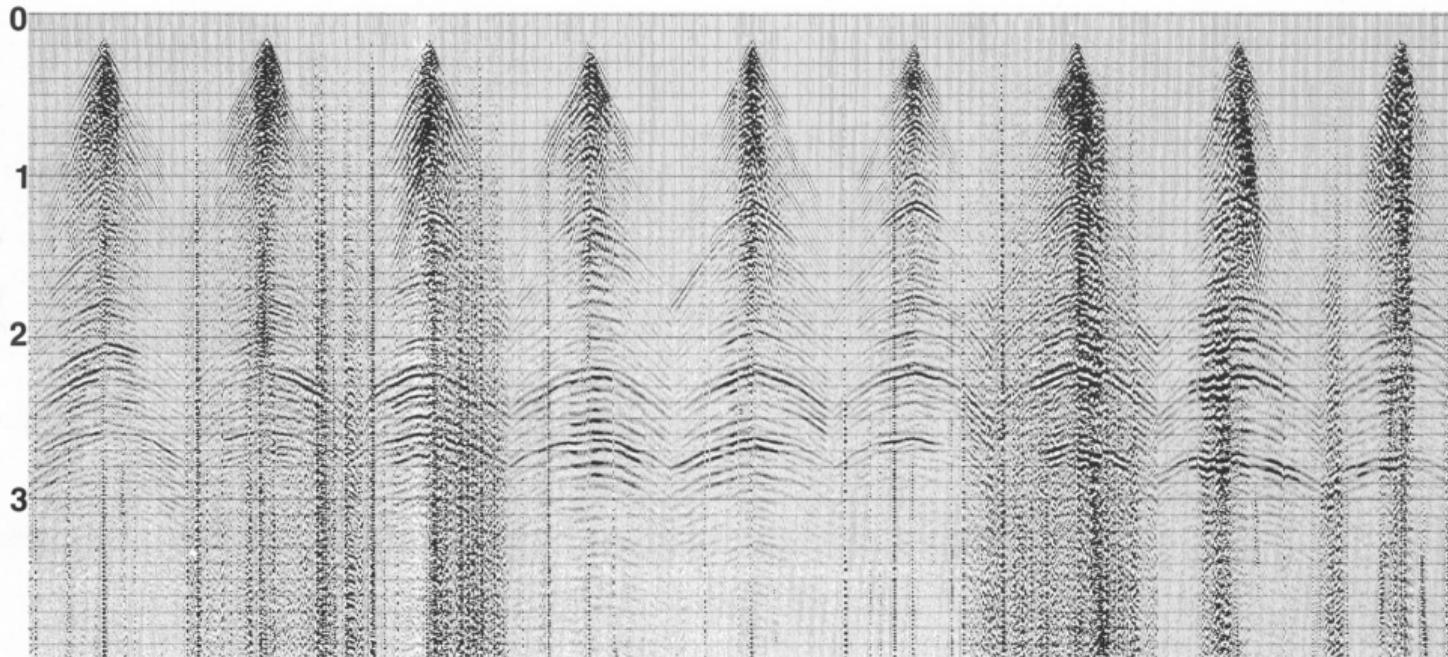
Sans correction



# 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.

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

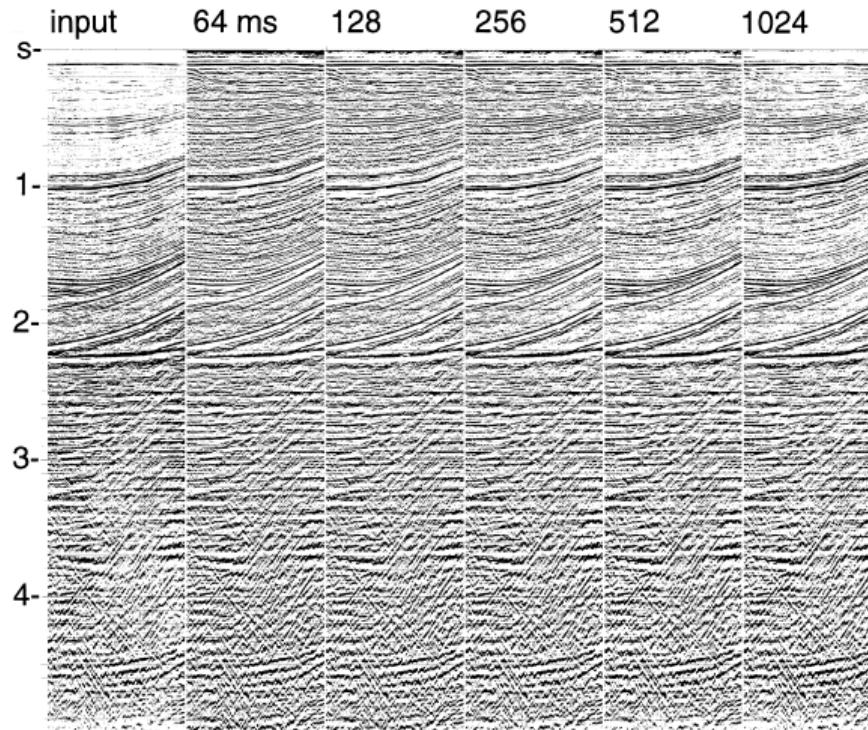
où

- $g(t)$  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

- 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  $\tau$  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  $\phi$  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

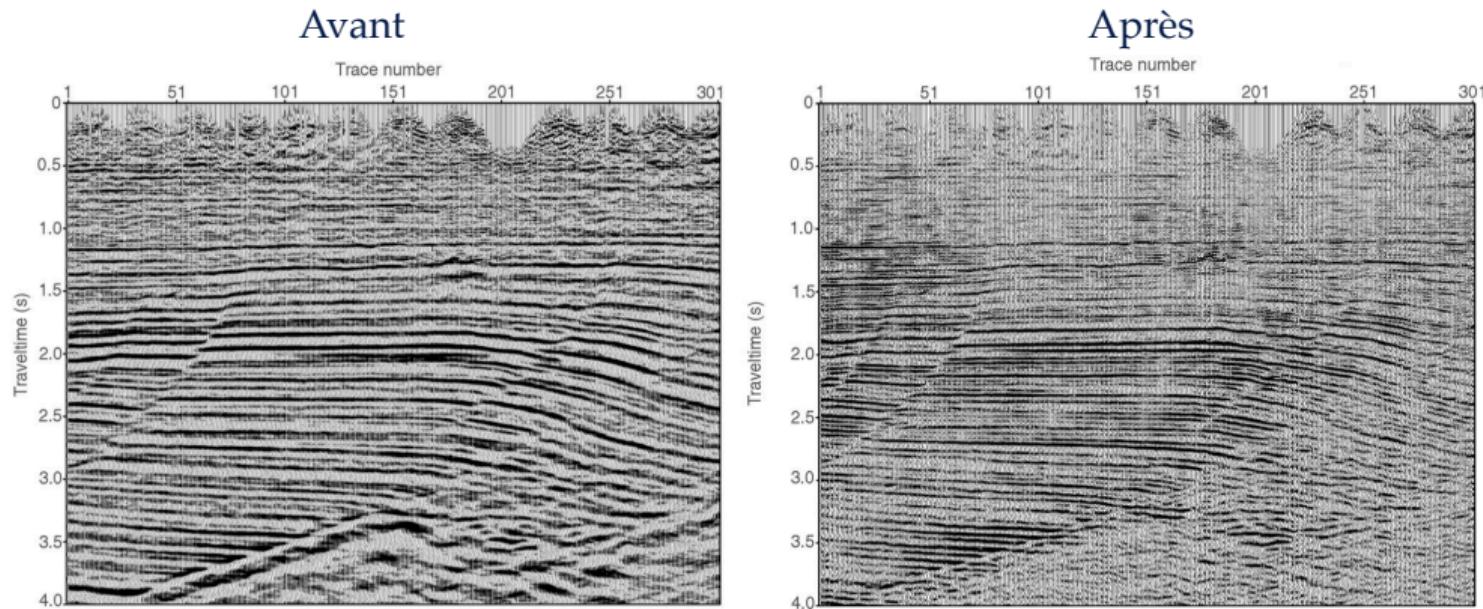
- L'application du filtre sur une trace réelle de  $n$  échantillons est faite de façon récursive;
- Il faut d'abord définir un pas  $\Delta\tau$  et appliquer

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

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



# Inverse Q filtering

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

