

GML6201A

—

Techniques géophysiques de haute résolution

—

Sismique réflexion

Bernard Giroux

giroux@geo.polymtl.ca

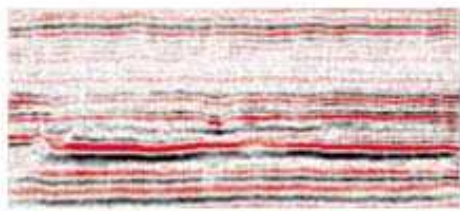
École Polytechnique de Montréal

Principes	
Introduction	transparent n° 3
Principe général	transparent n° 4
Propagation d'une onde élastique	transparent n° 5
Loi de Snell-Descartes	transparent n° 6
Coefficient de réflexion	transparent n° 7
Onde directe	transparent n° 8
Ondes réfractée et réfléchie	transparent n° 9
Vitesses sismiques des roches	transparent n° 10
Méthodes	
Fenêtre optimale	transparent n° 12
Point milieu commun (<i>Common mid point</i>)	transparent n° 14
Comparaison	transparent n° 16
Traitement des données	
Généralités	transparent n° 18
Correction statique	transparent n° 19
Gain	transparent n° 20
Correction dynamique (NMO)	transparent n° 21
Exemple de correction	transparent n° 23
Analyse de vitesse	transparent n° 24
Filtrage en fréquence	transparent n° 25
Domaine $f-k$	transparent n° 26
Migration	transparent n° 28
Résolution	
Longueur d'onde	transparent n° 30
Résolution et détection	transparent n° 31
Sources, détecteurs	
Sources	transparent n° 33
Récepteurs	transparent n° 36
Couplage des géophones	transparent n° 37
Réponse en fréquence des géophones	transparent n° 38
Applications	
Étude stratigraphique	transparent n° 40
Étude d'une vallée glaciaire	transparent n° 45
Références	
Références	transparent n° 54

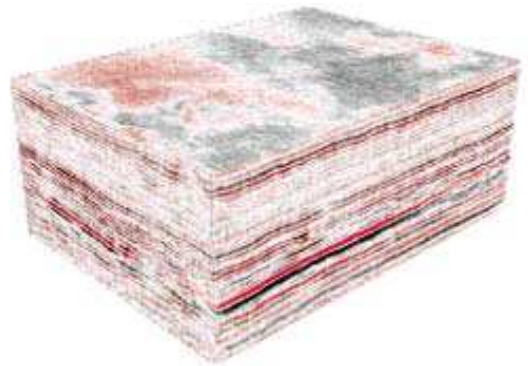
Principes

Introduction

- Que voit la sismique réflexion ?
 - Des ondes élastiques réfléchies par des structures présentant un contraste d'impédance (produit densité-vitesse).



Sismique réflexion 2D

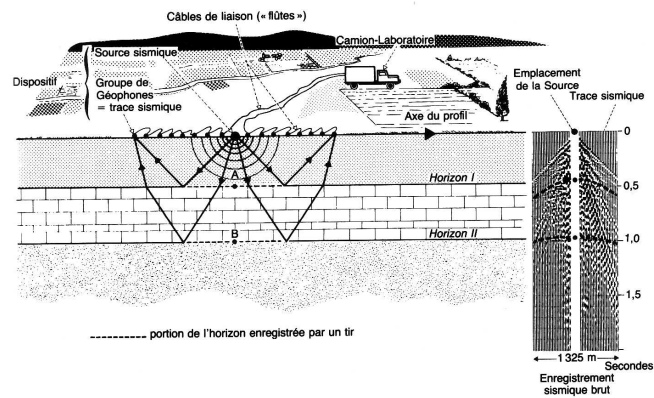


Sismique réflexion 3D

- Sismique réflexion et génie :
 - recherche d'aquifères ;
 - topographie du socle ;
 - délimitation des zones fracturées ;
 - étude stratigraphique du Quaternaire.

Principe général

- Un « séisme » artificiel de faible amplitude est généré par un émetteur, à un temps et un endroit prédéterminé ;
- Des récepteurs enregistrent les séismes, ces enregistrements composent les traces ;
- L'ensemble des traces forme un enregistrement sismique ;
- Ces enregistrements sont échantillonnés, numérisés et sauvegardés ;
- Le dispositif émetteur et récepteurs forme un tir sismique ;
- Un ensemble de tirs forme un profil sismique.



Propagation d'une onde élastique

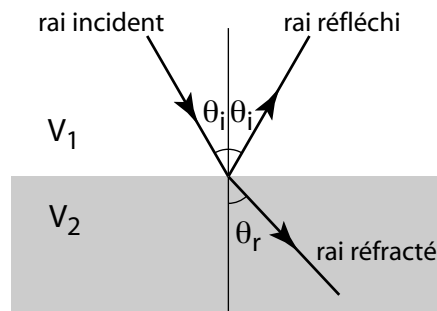
- Les ondes sismiques sont
 - des patrons de déformation de particules à travers les matériaux ayant des vitesses
 - qui dépendent de leurs propriétés élastiques et de leurs densités.
- Les déformations se font
 - en compression (ondes P) ;
 - en cisaillement (ondes S).
- Les deux types de déformations sont toujours présentes ;
 - il y a conversion aux interfaces, par ex. une onde P incidente génère des ondes P et S réfléchies et P et S réfractées.
- Les conditions particulières à une surface libre font qu'il existe des déformations d'autres types à la surface de la terre (ondes de Rayleigh, ondes de Love).
- Généralement, la source sismique produit également une onde aérienne qui induit une vibration mesurable en surface.

Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 5

Loi de Snell-Descartes

- Si l'onde sismique rencontre une interface
 - une partie de l'énergie est réfléchié ;
 - une partie est réfractée.



- La loi de Snell-Descartes stipule que

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{V_1}{V_2}. \quad (1)$$

- Toute l'énergie est réfractée si l'angle est supérieur à $\theta_c = \arcsin \frac{V_1}{V_2}$.

Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 6

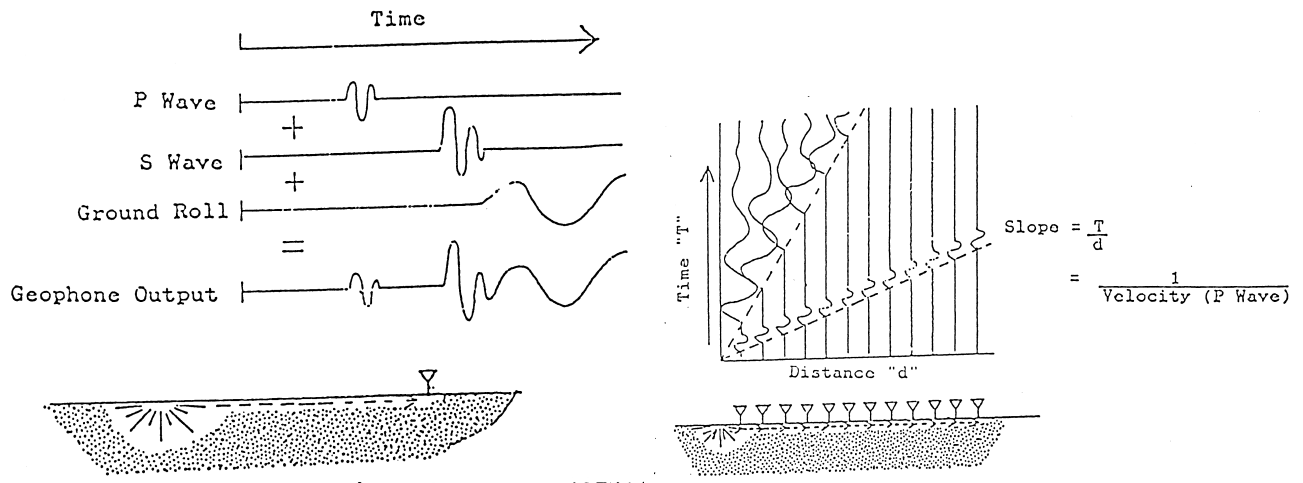
Coefficient de réflexion

- Pour une incidence normale à l'interface entre deux unités, l'amplitude de l'onde réfléchie est donnée par le coefficient de réflexion

$$R = \frac{V_2\rho_2 - V_1\rho_1}{V_2\rho_2 + V_1\rho_1} \quad (2)$$

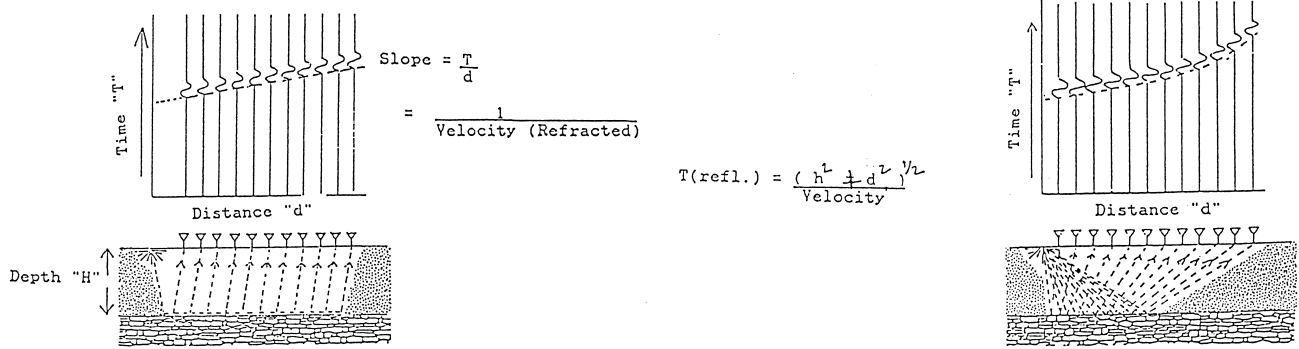
- La polarité de l'ondelette est inversée si l'impédance de la couche inférieure est plus faible ($V_2\rho_2 < V_1\rho_1$).

Onde directe



- Dans un milieu homogène, les ondes sismiques enregistrées sont
 1. les ondes P ;
 2. les ondes S ;
 3. les ondes de surface (*ground roll*).

Ondes réfractée et réfléchié



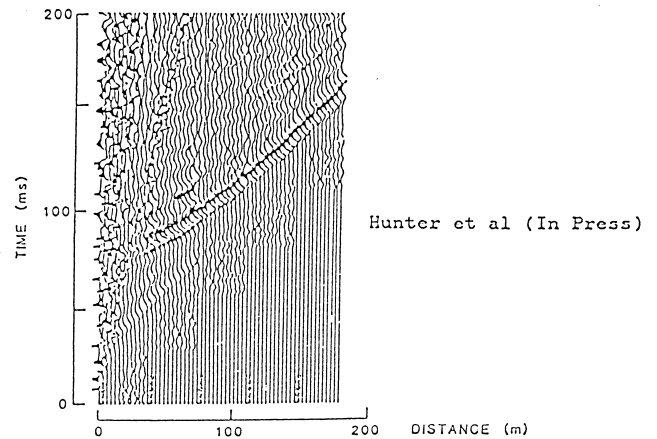
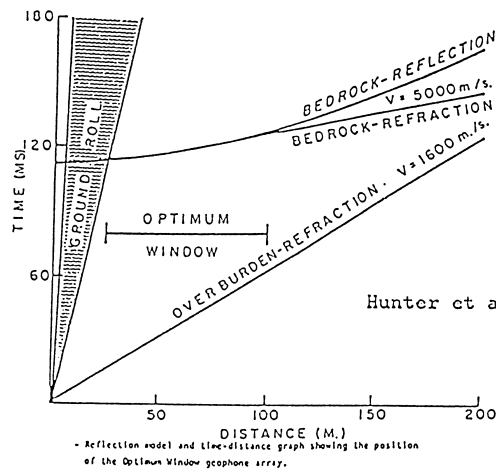
- En présence d'une interface, on enregistre également
 1. une onde réfractée ;
 2. une onde réfléchié.

Vitesses sismiques des roches

Nature des terrains	V_p [m/s]	V_s [m/s]	ρ [g/cm ³]
éboulis, terre végétale	300-700	100-300	1.7-2.4
sable sec	400-1200	100-500	1.5-1.7
sable humide	1500-4000	400-1200	1.9-2.1
argiles	1100-2500	200-800	2.0-2.4
marnes	2000-3000	750-1500	2.1-2.6
grès	3000-4500	1200-2800	2.1-2.4
calcaires	3500-6000	2000-3300	2.4-2.7
craie	2300-2600	1100-1300	1.8-2.3
sel	4500-5500	2500-3100	2.1-2.3
anhydrite	4000-5500	2200-3100	2.9-3.0
dolomie	3500-6500	1900-3600	2.5-2.9
granite	4500-6000	2500-3300	2.5-2.7
basalte	5000-6000	2800-3400	2.7-3.1
charbon	2200-2700	1000-1400	1.3-1.8
eau	1450-1500	-	1
glace	3400-3800	1700-1900	0.9
huile	1200-1250	-	0.6-0.9

Méthodes

Fenêtre optimale



- L'idée est de déterminer la fenêtre à l'intérieur de laquelle on n'enregistre que des ondes réfléchies ;
- Des mesures préliminaires sur le terrain permettent de déterminer la fenêtre ;
- Un déport source-récepteur (*offset*) peut ainsi être déterminée pour le levé.

Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 12

Fenêtre optimale

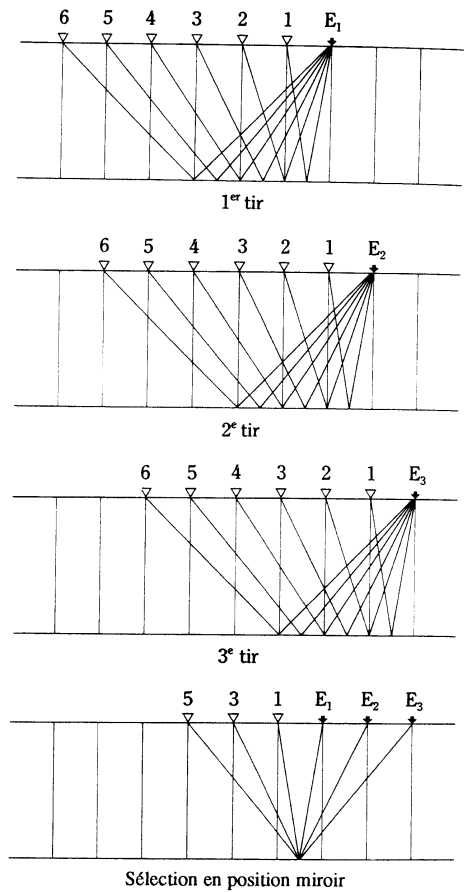
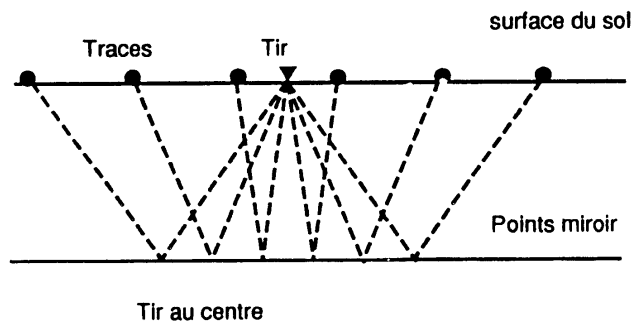
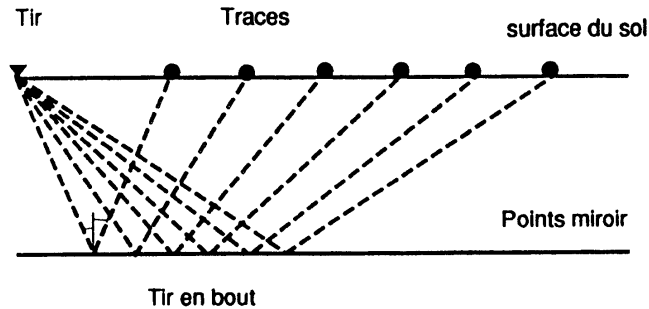
- Les paramètres du dispositif sont constants :
 - la section est construite une trace à la fois ;
 - le déport source-récepteur est fixe, choisi à l'intérieur de la fenêtre optimale ;
 - le dispositif en entier est déplacé successivement pour couvrir la zone d'intérêt.
- Avantages
 - simplicité d'acquisition ;
 - simplicité du post traitement ;
 - les signaux indésirables (*ground-roll*, onde réfractée) n'apparaissent pas dans les données.
- Désavantages
 - les paramètres peuvent être difficiles à déterminer ;
 - faible rapport signal/bruit (couverture simple) ;
 - information limitée sur la vitesse du milieu.

Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 13

Point milieu commun (*Common mid point*)

- L'idée est de tirer profit de la redondance de l'information.



Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 14

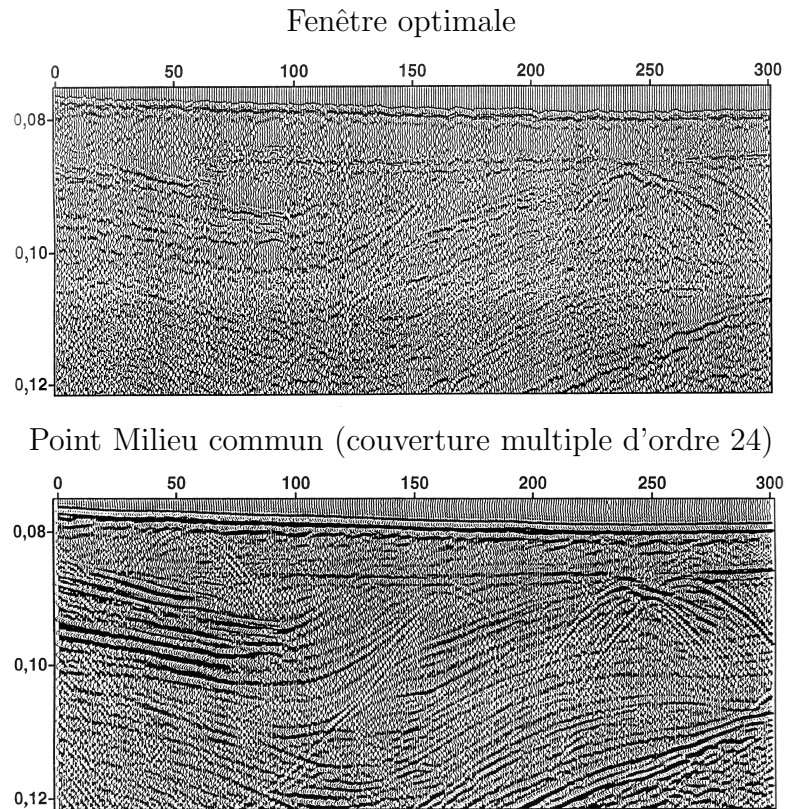
Point milieu commun (*Common mid point*)

- CMP : ensemble des traces associées à des couples point de réception-point de tir tel que le point situé à mi-distance entre l'émetteur et le récepteur soit le même ;
- Les traces correspondant à un point milieu sont traités (NMO) et sommées pour former une seule trace :
 - les réflexions s'additionnent ;
 - les bruits non corrélés s'annulent.
- Il faut que le pendage soit faible (sinon, la correction est le DMO).
- Avantages
 - augmentation considérable du rapport signal/bruit ;
 - analyse de vitesse requise, donc conversion temps-profondeur plus précise.
- Désavantages
 - acquisition relativement longue ;
 - traitement des données plus complexe.

Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 15

Comparaison



Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 16

Traitement des données

Généralités

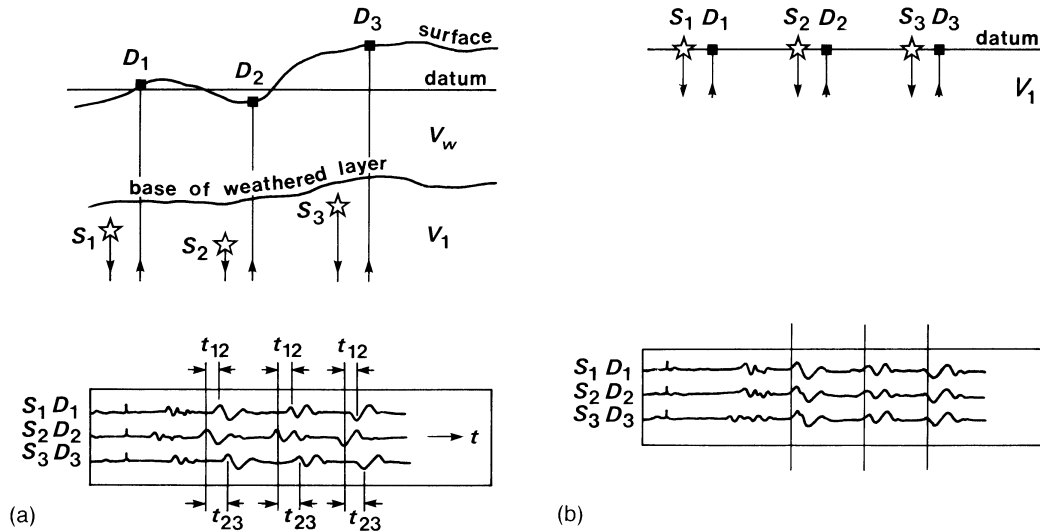
- La séquence de traitement varie selon la méthode utilisée.
- Fenêtre optimale :
 - corrections statiques ;
 - application d'une fonction temporelle de gain ;
 - filtrage en fréquence ;
 - transformation de la relation $t-x$ à $z-x$.
- Point milieu commun :
 1. pré-traitement : édition, gain, filtrage, déconvolution ;
 2. corrections statiques et dynamiques (NMO, DMO), analyse de vitesse ;
 3. sommation ;
 4. migration, déconvolution stratigraphique.
- Les principaux traitements sont brièvement introduits.

Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 18

Correction statique

- Les irrégularités de surface et les différences d'élévation entraînent des délais entre les traces ;
- La correction statique élimine ces délais, pour ramener les traces à un datum commun.

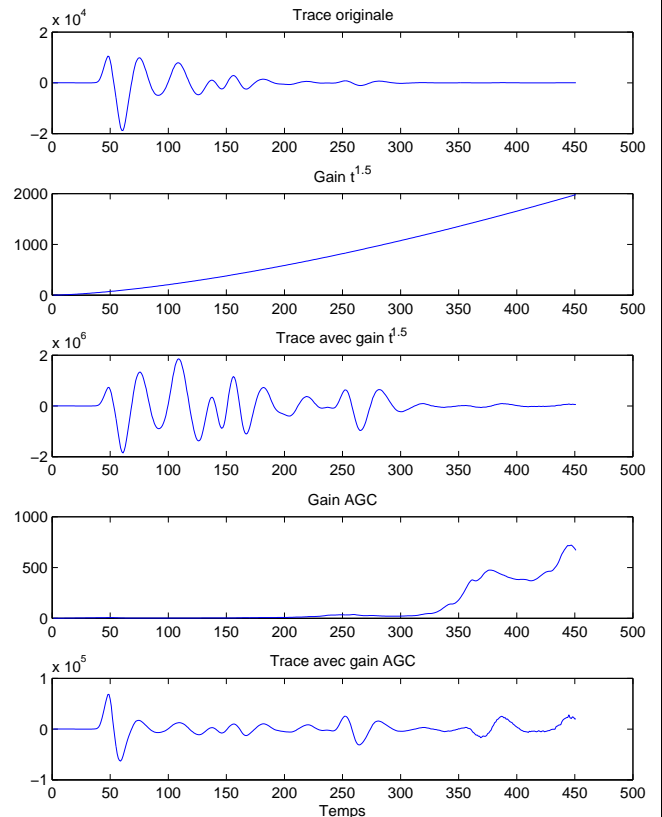


Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 19

Gain

- La divergence géométrique entraîne une diminution de l'amplitude de l'ondelette en fonction du temps ;
- Une fonction gain est appliquée aux traces pour compenser la décroissance :
 - amplitudes préservées : $A(t) = A_0 t^n$;
 - égalisation dynamique (AGC) : correction sur une fenêtre glissante.

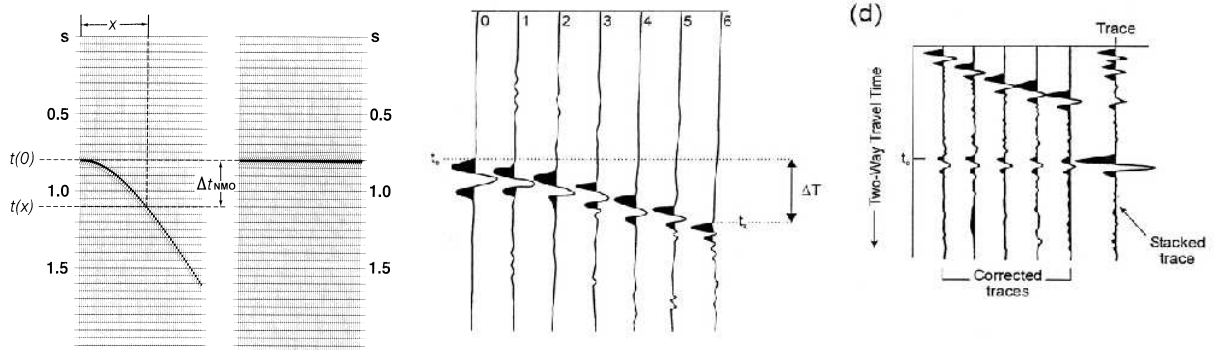


Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 20

Correction dynamique (NMO)

- Cette correction compense pour le retard dû à l'écartement croissant entre la source et les récepteurs ;
- Elle est appliquée avant de faire la sommation en point milieu commun (*CMP stack*) ;



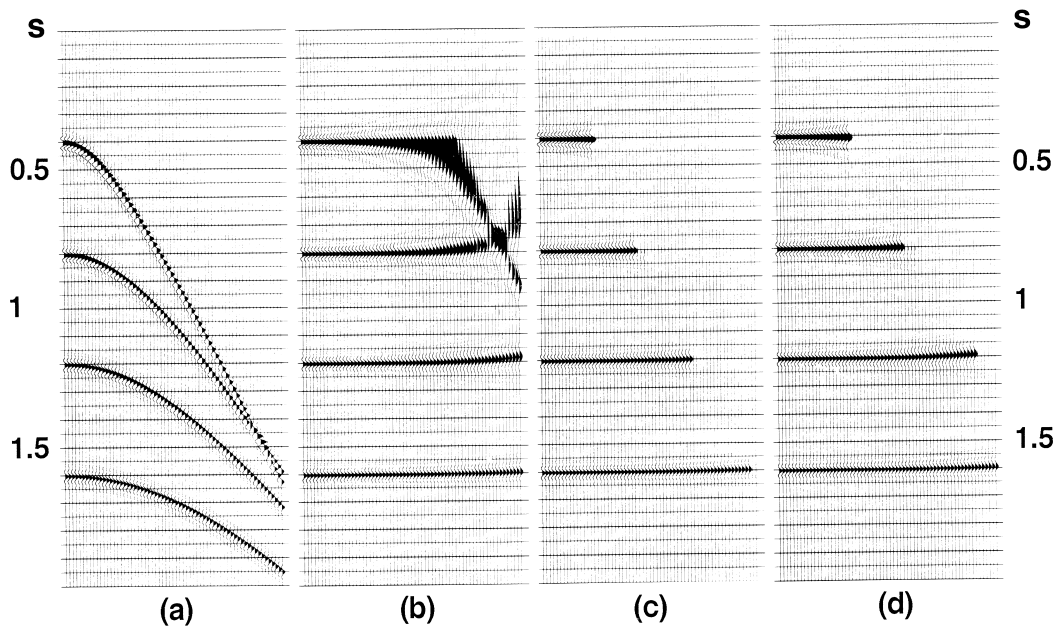
- La correction est appliquée à chaque échantillon de la trace, en fonction de l'écartement source-récepteur et du temps d'arrivée ;
- Elle a pour effet de simuler une onde à incidence verticale ;
- Elle est faite en accroissant l'incrément de temps entre les échantillons de la trace ;

Bernard Giroux

GML6201A - Sismique réflexion — transparent n° 21

Correction dynamique (NMO)

- La correction NMO provoque un allongement de l'ondelette mesurée ;
- Lorsque l'allongement est supérieur à un seuil donné, l'ondelette est supprimée (*mute*) :
 - a) données, b) après NMO, c) seuil 50%, d) seuil 100%.

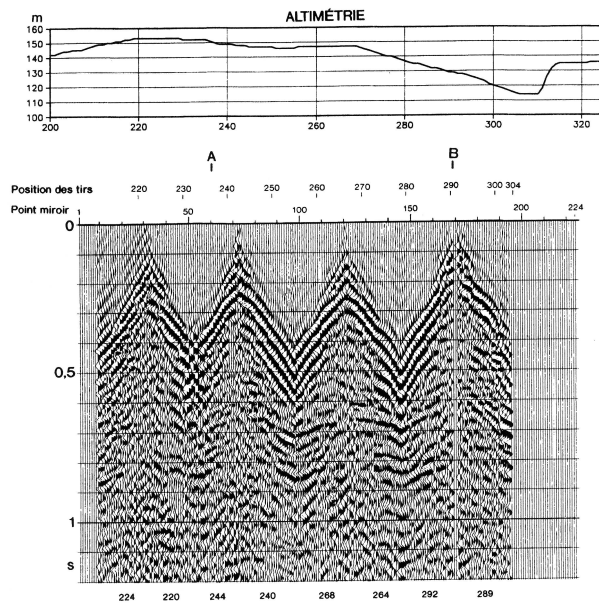


Bernard Giroux

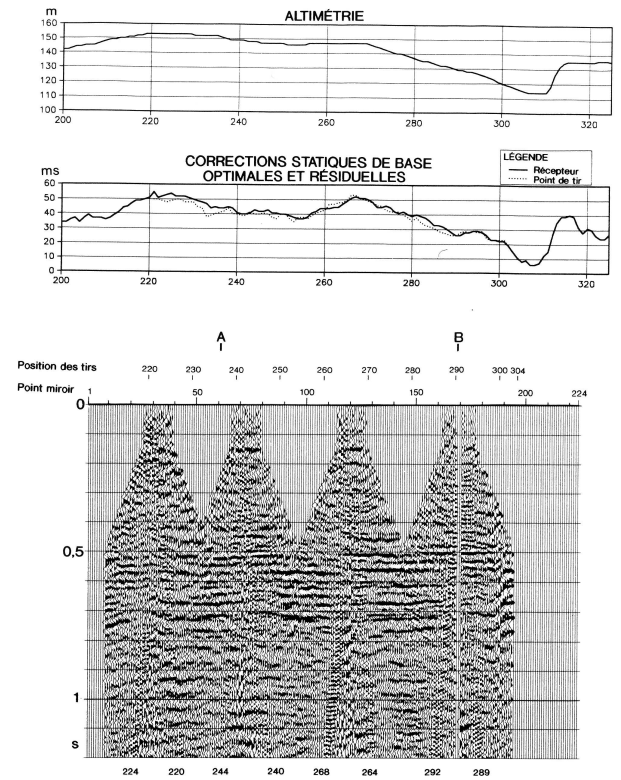
GML6201A - Sismique réflexion — transparent n° 22

Exemple de correction

Données brutes

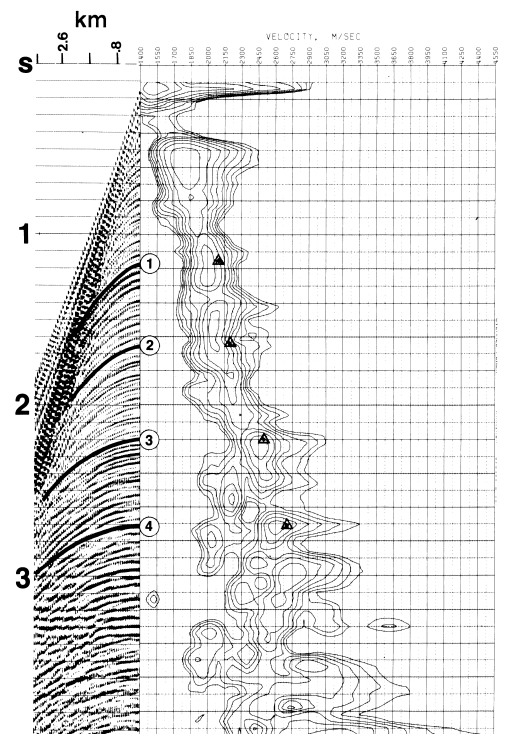


Après corrections statiques & dynamiques



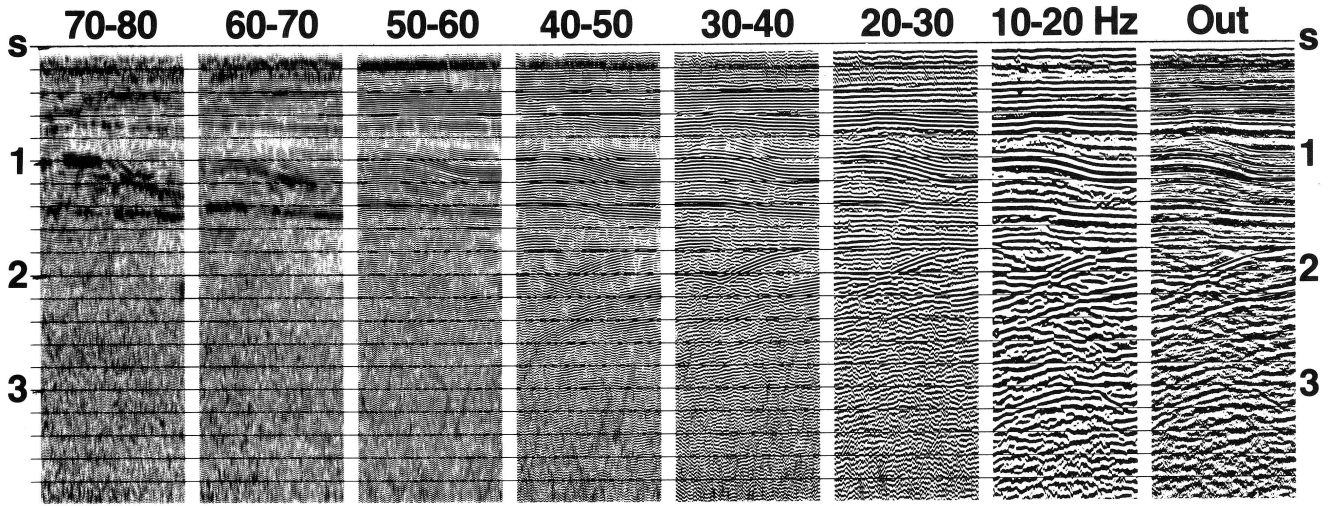
Analyse de vitesse

- La vitesse dans le milieu doit être connue, entre autre pour faire la correction NMO ;
- L'analyse de vitesse peut se faire à partir du spectre de vitesse ;
- Le spectre de vitesse est construit
 - en sommant le CMP, ou en calculant la cohérence, successivement pour un ensemble de vitesses ;
 - en traçant le contour des sommations obtenues pour chacune des vitesses.



Filtrage en fréquence

- Objectif du filtrage :
 - garder une bande de fréquence donnée avec un minimum de modification ;
 - supprimer le reste autant que possible.

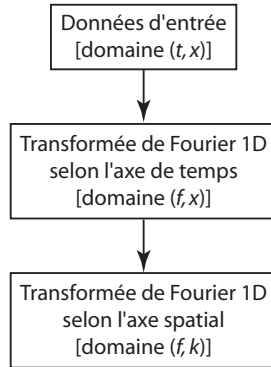


Bernard Giroux

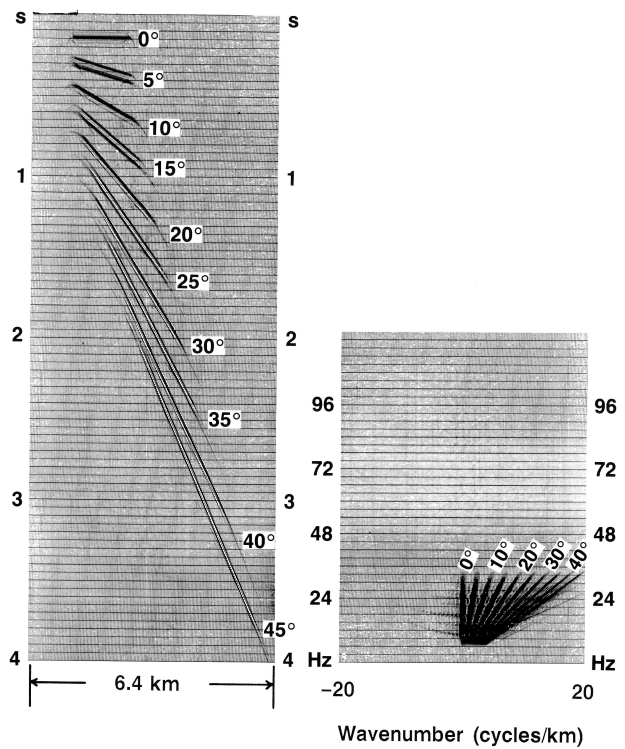
GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 25

Domaine $f-k$

- Calcul :



Exemple

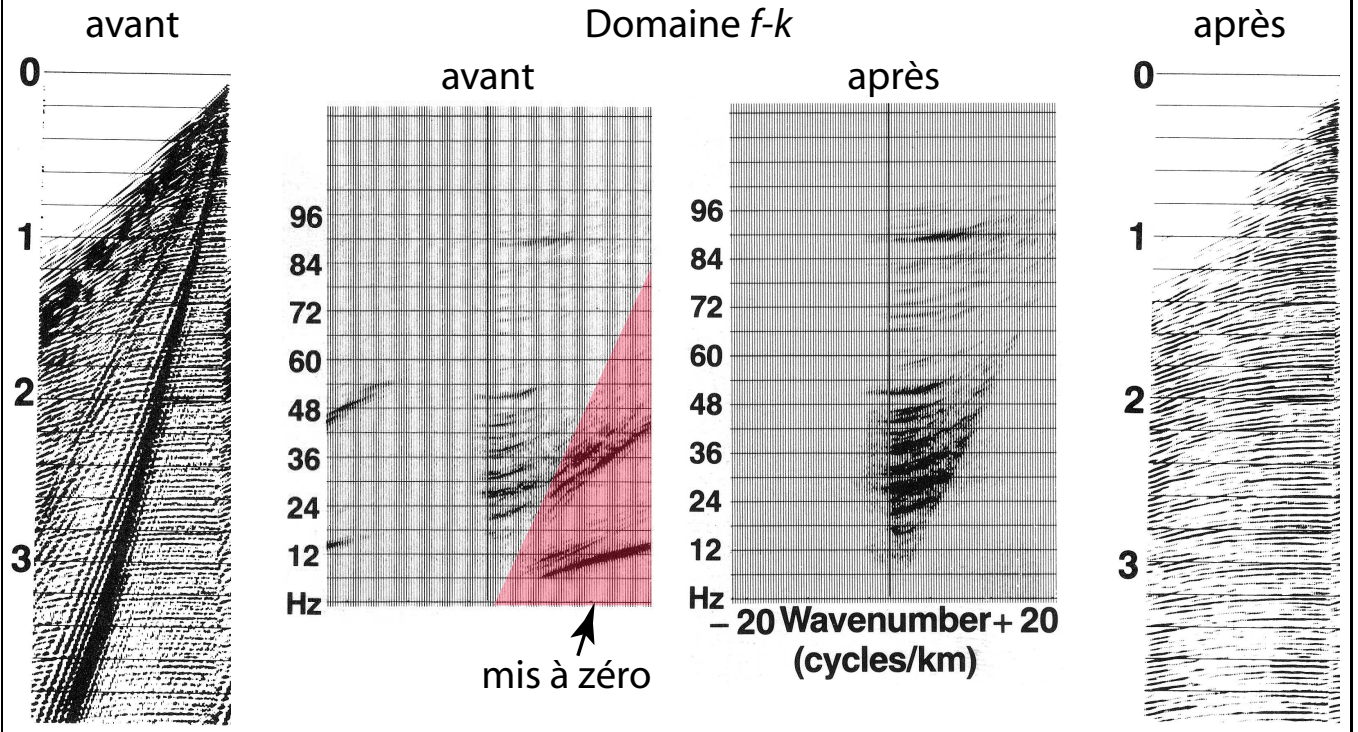


Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 26

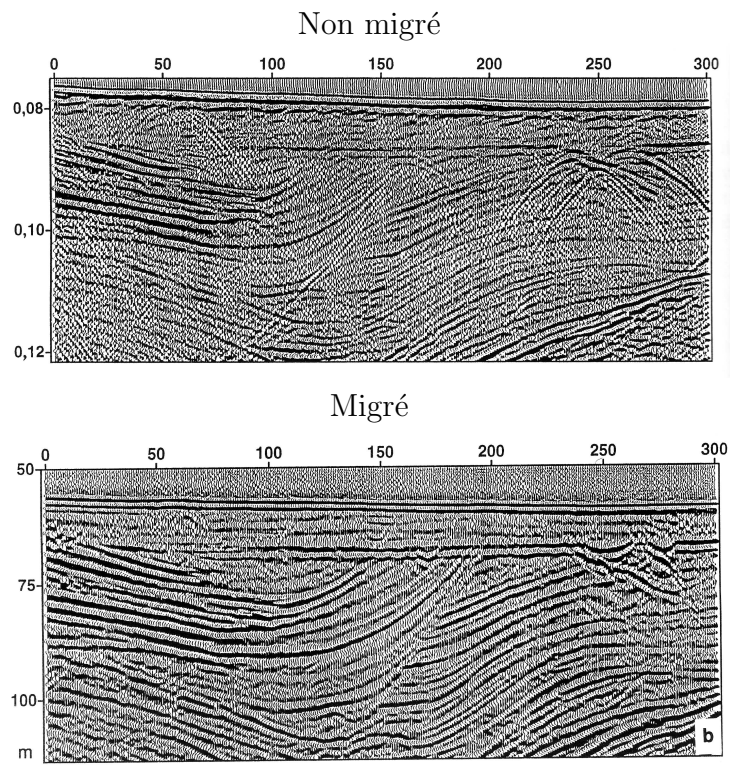
Filtrage $f-k$

Élimination du bruit cohérent par filtrage $f-k$



Migration

- Transformation de l'axe de temps en axe de profondeur ;
- Repositionnement des réflecteurs à leur position « vraie ».



Résolution

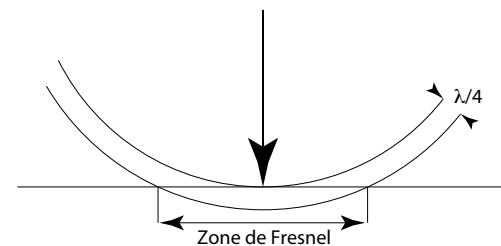
Longueur d'onde

- Le signal mesuré est une ondelette, de fréquence dominante f donnée (bande passante donnée) ;
- Pour une vitesse de propagation V donnée, la longueur d'onde est $\lambda = V/f$;

Fréquence (Hz)	Longueur d'onde (m)				
	Vitesse (m/s)				
	1000	2000	3000	4000	5000
1	1000	2000	3000	4000	5000
40	25	50	75	100	125
100	10	20	30	40	50
500	2	4	6	8	10

Résolution et détection

- Pouvoir de résolution
 - capacité de séparer en profondeur deux horizons ;
 - de l'ordre de $\lambda/4$ à $\lambda/2$ selon la largeur de bande et le niveau de bruit.
- Pouvoir de détection
 - la plus petite couche qui puisse donner naissance à une réflexion ;
 - se situe entre $\lambda/30$ et $\lambda/10$.
- Résolution latérale
 - capacité d'individualiser latéralement deux événements ;
 - reliée à la zone de Fresnel ;



- Bref : plus la longueur d'onde est courte (et la fréquence élevée), meilleure est la résolution.

Sources, détecteurs

Sources

- Caractéristiques d'une bonne source :
 - haute fréquence ;
 - large bande (trois octaves) ;
 - énergétique.
- Les sources sont de trois types :
 1. impact : marteau, chute de poids ;
 2. explosive : fusil à cartouche (*buffalo gun*) ;
 3. vibratoire : vibroseis, MiniSosie.

Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 33

Sources

Fusil à cartouche

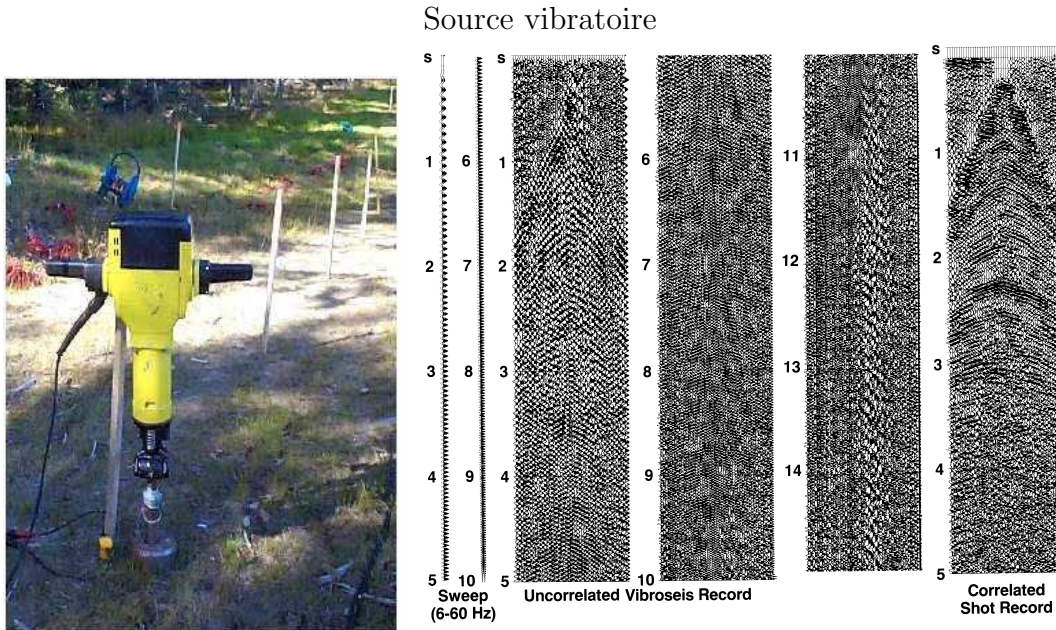


- Le bout du fusil est enfoncé dans un trou d'un mètre rempli d'eau, ce qui améliore le couplage et permet de réduire l'arrivée dans l'air.

Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 34

Sources



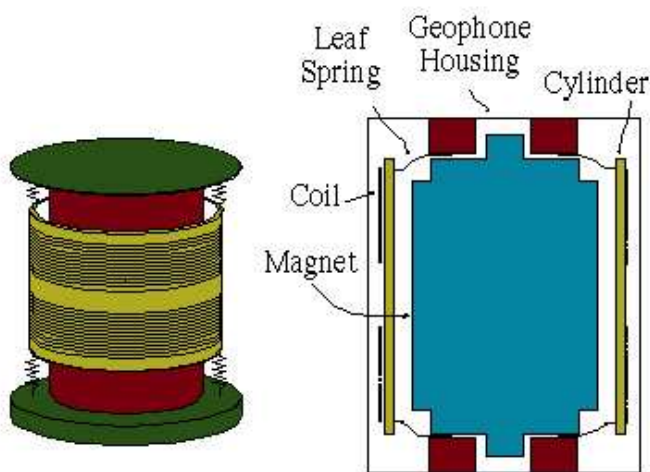
- La source vibre à fréquence croissante pendant une durée donnée ;
- La fonction source (*sweep*) est inter-corrélée avec les traces enregistrés ;
- Lorsqu'il y a réflexion, la corrélation est élevée.

Bernard Giroux

GML6201A - Sismique réflexion — transparent n° 35

Récepteurs

- Géophone :
 - 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.

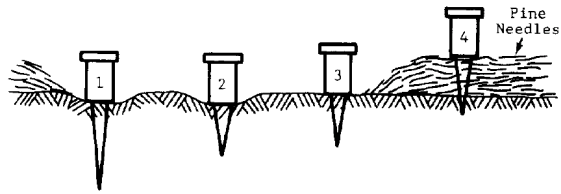


Bernard Giroux

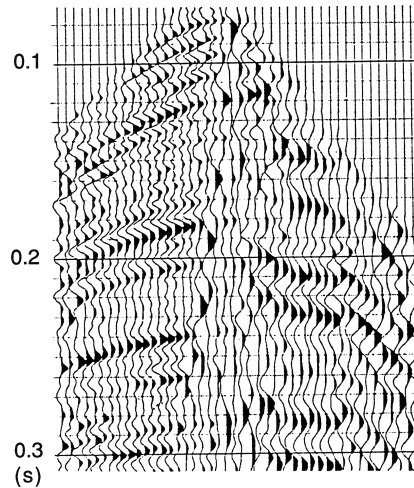
GML6201A - Sismique réflexion — transparent n° 36

Couplage des géophones

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



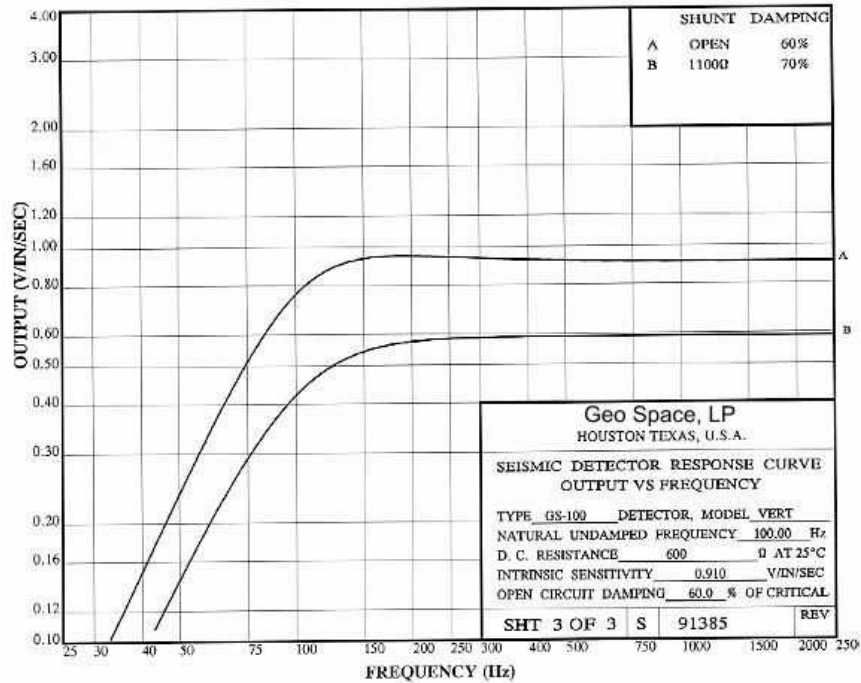
– (1 : excellent → 4 : médiocre)



gauche : géophones enterrés, droite : géophones en surface.

Réponse en fréquence des géophones

- Le géophone agit comme filtre passe-haut ;
- En sismique réflexion de haute résolution, l'utilisation de géophones de 100 Hz est préconisée.



Applications

Étude stratigraphique

- Slaine, D. D., Pehme, P. E., Hunter, J. A., Pullan, S. E., et Greenhouse, J. P. (1990). Mapping overburden stratigraphy at a proposed hazardous waste facility using shallow seismic reflection methods.
Dans Ward, S., éditeur, *Geotechnical and environmental geophysics, volume 2 : Environmental and groundwater*, number 5 in Investigations in Geophysics, pages 273–280. Society of Exploration Geophysicists ;

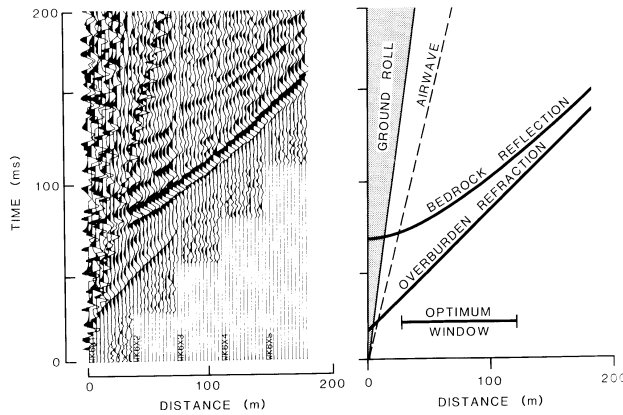
- Étude sur un site proposé de traitement des déchets dangereux ;
- Géologie : trois unités de silt-argile dans le 50 premiers mètres ;
 - les couches d’argile agissent comme barrière en cas de fuite ;
 - il ne faut pas qu’il y ait de discontinuité des unités imperméables ;
- La sismique utilisée pour déterminer la continuité du mort terrain.

Étude stratigraphique

- La résolution recherchée est élevée ;
- La présence d’argile force l’utilisation de la sismique ;
- Les auteurs ont utilisé la méthode de la fenêtre optimale ;
- Source : buffalo gun ; Géophones : 100 Hz ;
- L’analyse de vitesse a été faite à partir des collections en tir commun (*common shot gather*) :
 - rend possible la conversion temps-profondeur.
- Excellent site : fréquences dominantes mesurées de 500 Hz ;
- Conclusion : pas de discontinuités.

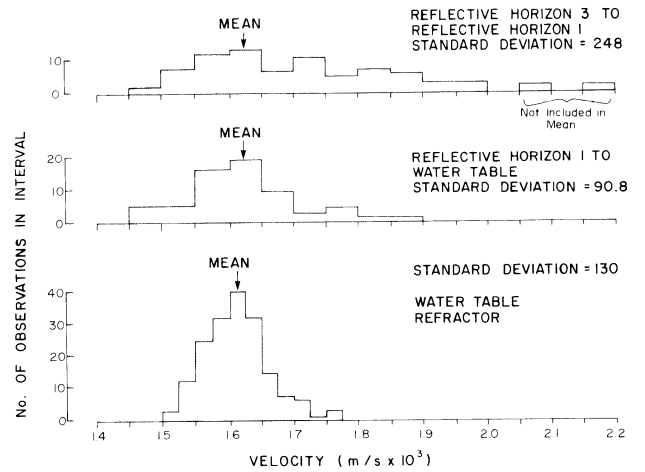
Étude stratigraphique

– Détermination de la fenêtre



– Analyse de vitesse

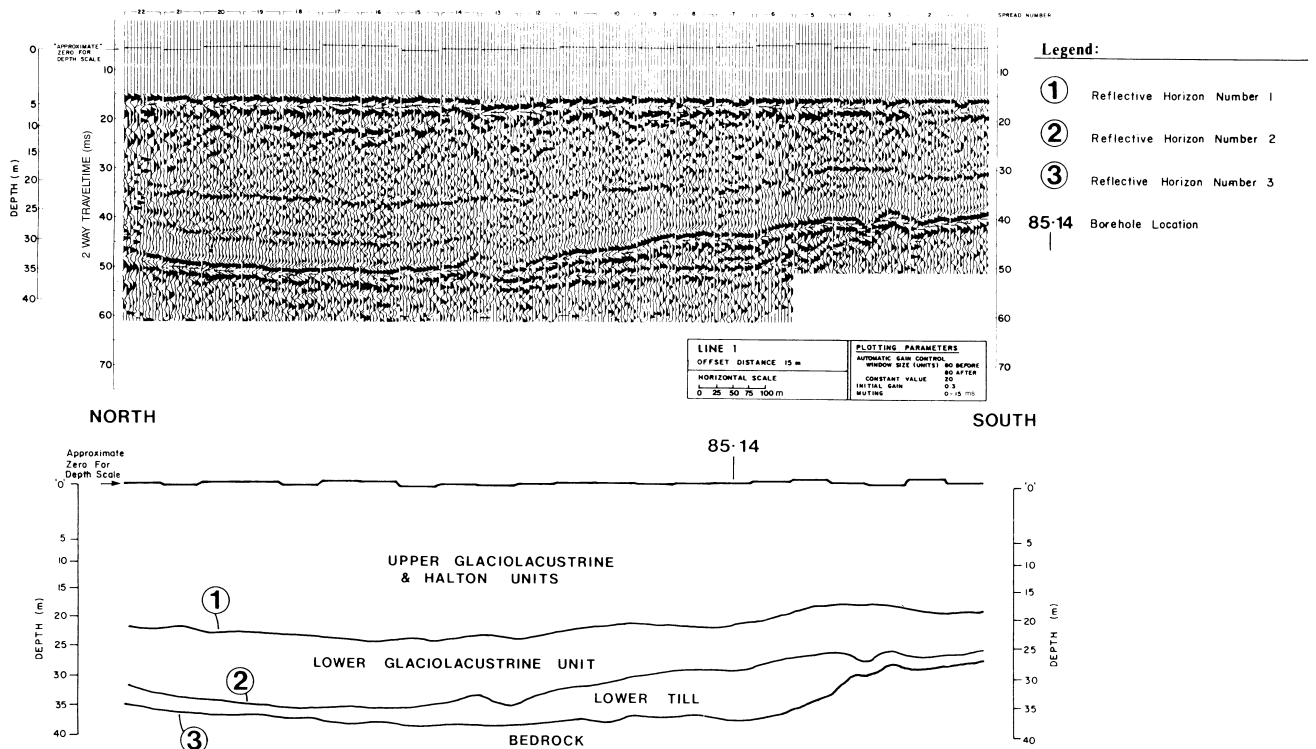
$$\text{Depth (m)} = \frac{|(VT)^2 - X^2|^{1/2}}{2} \quad (1)$$



Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 42

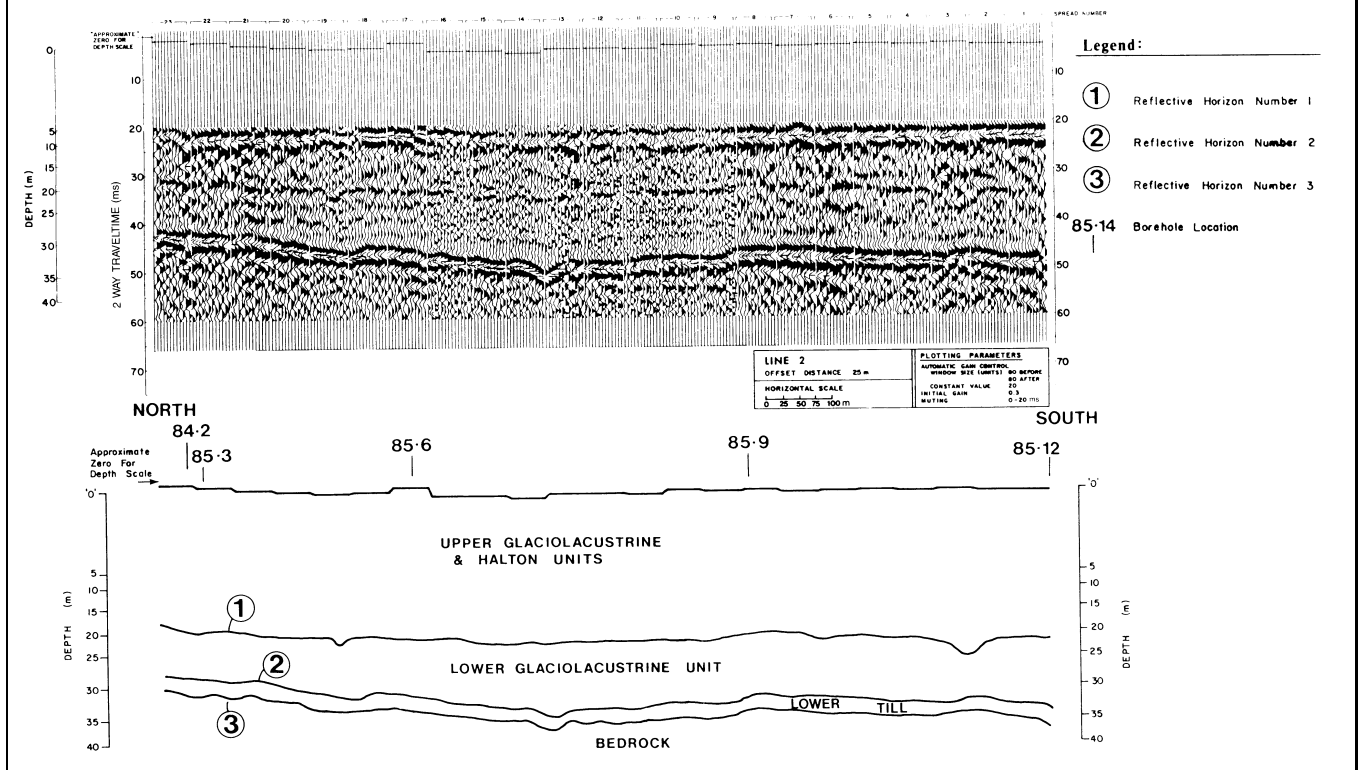
Étude stratigraphique



Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 43

Étude stratigraphique



Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 44

Étude d'une vallée glaciaire

- Buker, F., Green, A. G., et Horstmeyer, H. (1998).
Shallow seismic reflection study of a glaciated valley.
Geophysics, 63(4) :1395–1407 ;
- Vallée glaciaire : ressource en eau, et en sables et gravier ;
- Collection en couverture multiple (CMP) ;
- Image des sédiments jusqu'au roc (100 m et +) recherchée.

Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 45

Étude d'une vallée glaciaire

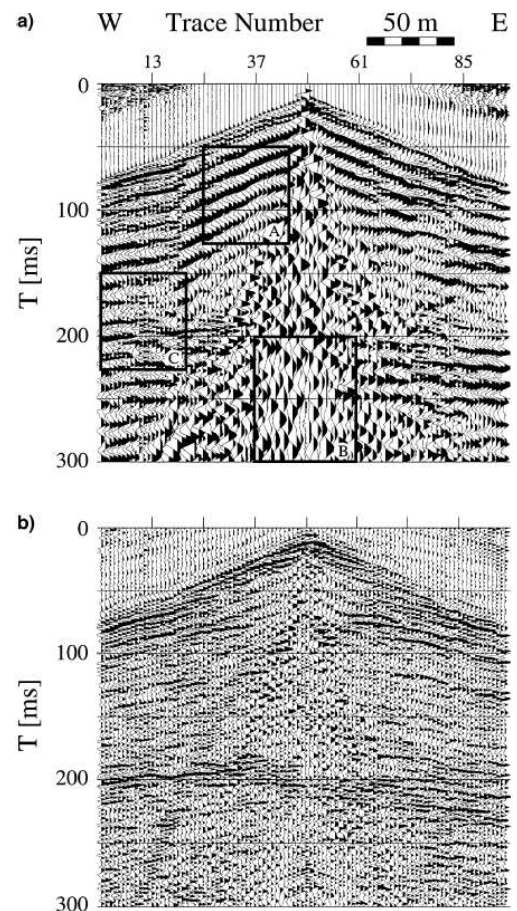
- Paramètres du levé :
 - source : masse de 5 kg (5 coups par tir) ;
 - géophones : 30 Hz ;
 - nombre de canaux : 72 et 96 (couverture d'ordre 36 et 48) ;
 - intervalle de tir : 2.5 m ;
 - séparation des géophones : 2.5 m ;
 - fenêtre : 500 ms.

Bernard Giroux

GML6201A - Sismique réflexion — transparent n° 46

Étude d'une vallée glaciaire

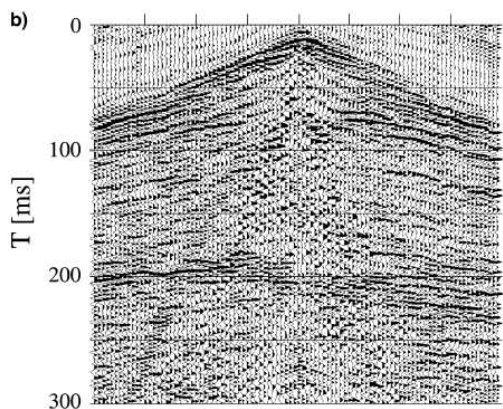
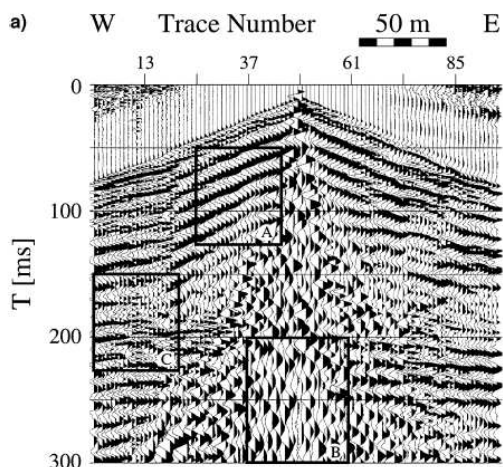
- Site favorable à la présence d'ondes guidées ;
 - onde guidée : « prise » dans une couche sous des conditions particulières.
- Ces ondes guidées masquent les réflexions et doivent être éliminées.



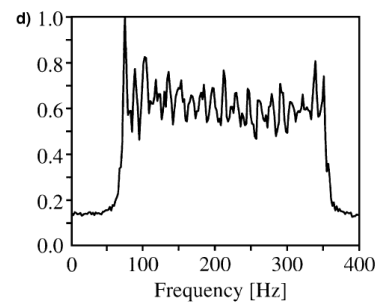
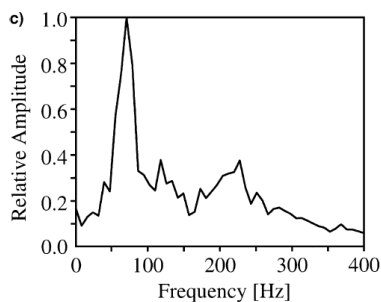
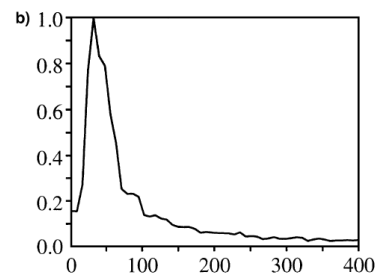
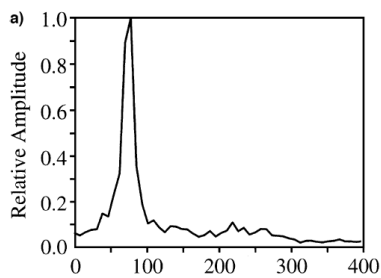
Bernard Giroux

GML6201A - Sismique réflexion — transparent n° 47

Étude d'une vallée glaciaire

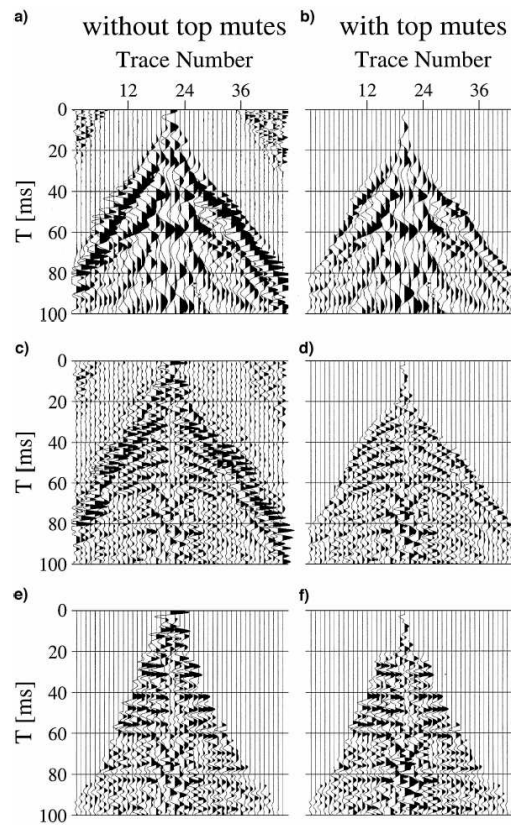


– Égalisation spectrale



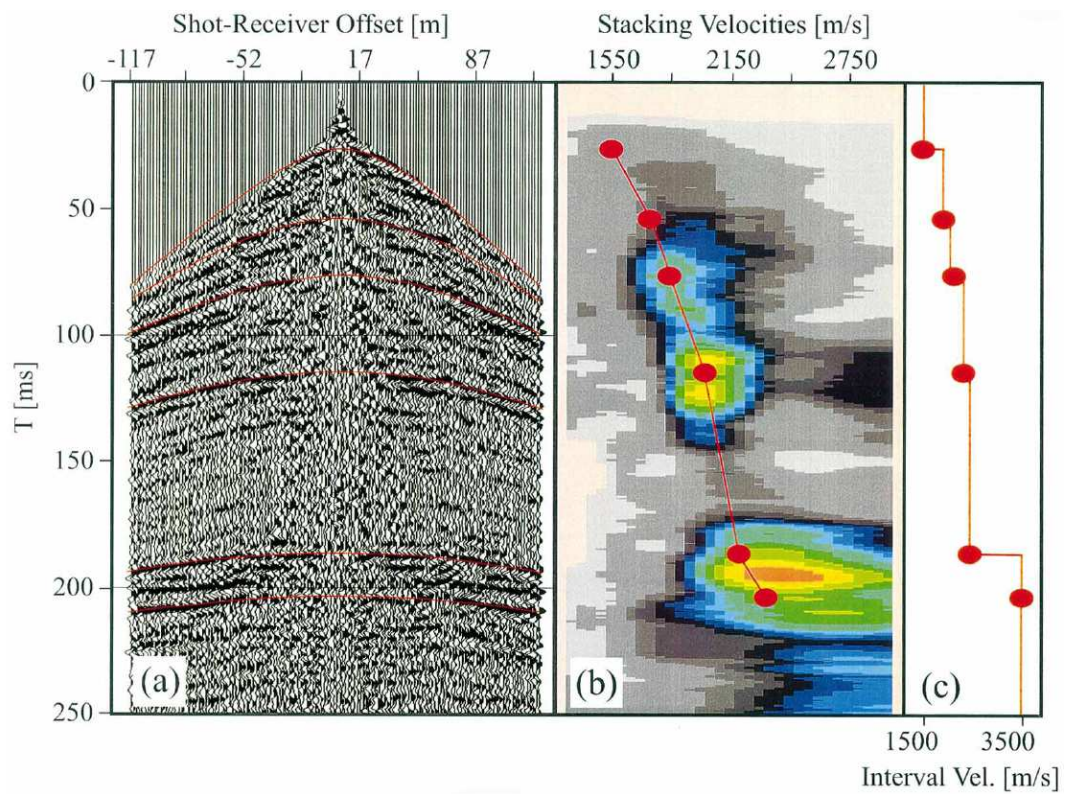
Étude d'une vallée glaciaire

– Mute manuel



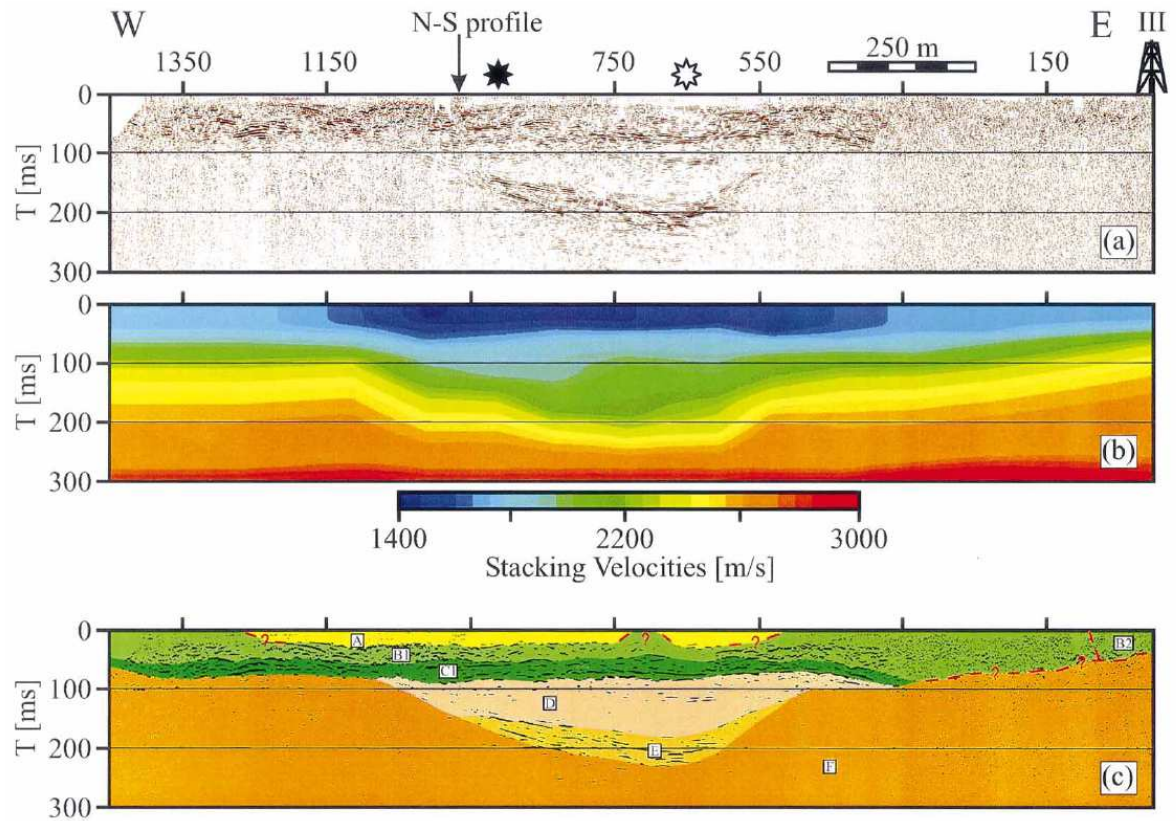
Étude d'une vallée glaciaire

– Analyse de vitesse



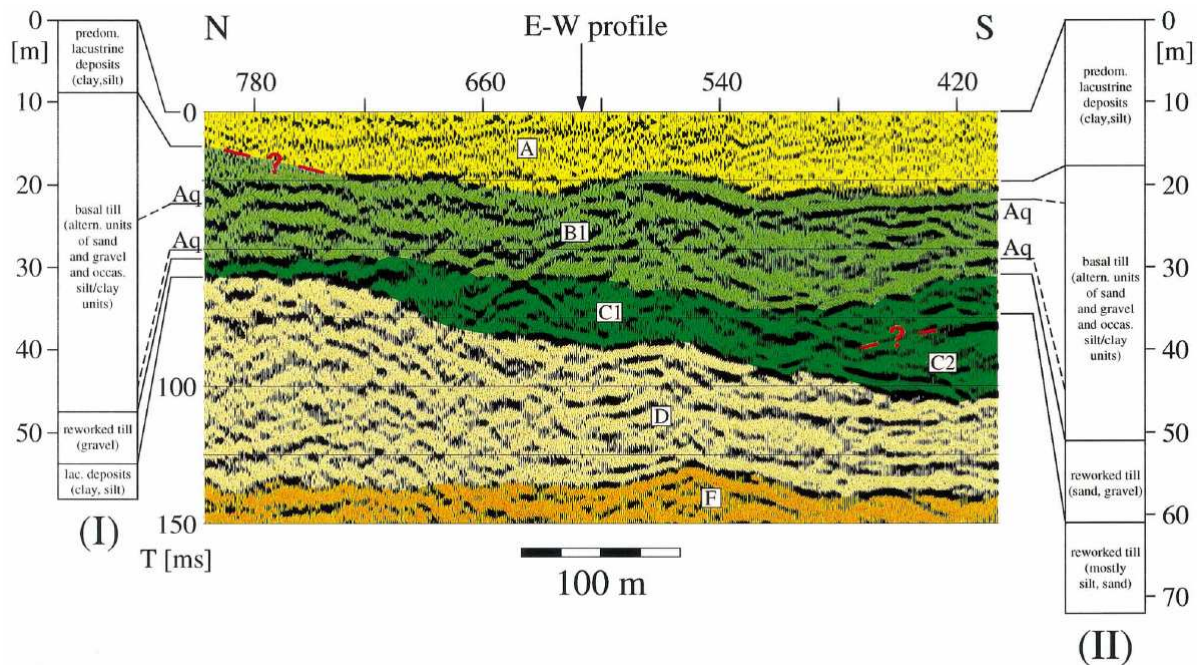
Étude d'une vallée glaciaire

- Résultats



Étude d'une vallée glaciaire

– Résultats



Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 52

Références

Références

- Keary, P. et Brooks, M. (1991).
An Introduction to Geophysical Exploration.
Blackwell Scientific Publications, 2nd edition ;
- Mari, J.-L., Arens, G., Chapellier, D., et Gaudiani, P. (1998).
Géophysique de gisement et de génie civil.
Éditions Technip, Paris ;
- Sheriff, R. E. et Geldart, L. P. (1995).
Exploration Seismology.
Cambridge University Press, 2 edition ;
- Yilmaz, O. (2000).
Seismic data Analysis.
Society of Exploration Geophysicists ;

Bernard Giroux

GML6201A – Sismique réflexion — transparent n° 54