

Interprétation de la sismique réfraction

Janvier 1999

W_GeoSoft Geological & Geophysical Software

Jacques JENNY

Chemin de la Léchaire
CH-1233-Lully Genève
Tel et Fax (++41 22) 757 23 53
jjenny@worldcom.ch
WEB <http://www.wgeosoft.ch>

Miguel BORREGUERO

Grand Rue 64
CH-2035 Corcelles
Fax (++41 32) 730 19 39
borreguero@bluewin.ch

Alain BURGISSER

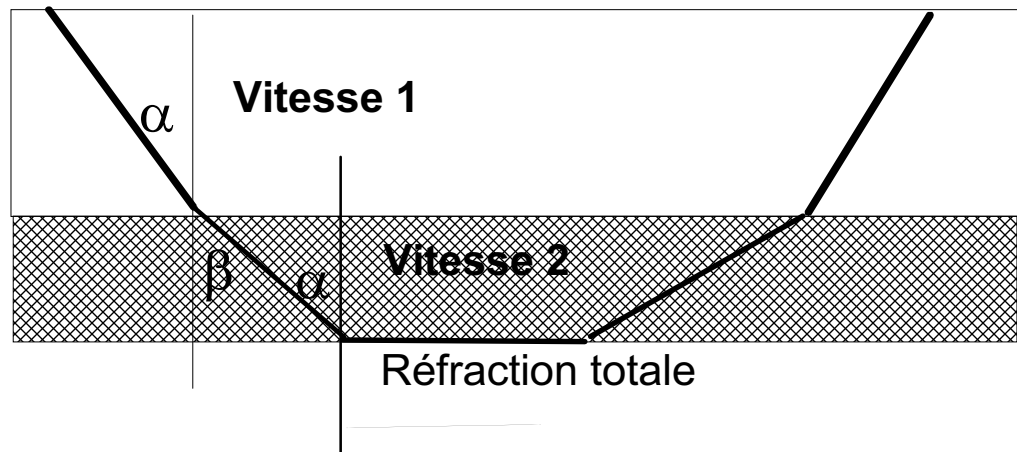
Chemin du Loup 3
CH-1233-LULLY
burgiss3@sc2a.unige.ch

1	INTRODUCTION	3
1.1	Acquisition des données	3
1.2	Géométrie des dispositifs de sismique réfraction	5
2	INTERPRETATION	6
2.1	Généralités	6
2.2	Pointage des "films"	6
2.3	Assemblage d'une dromochronique	7
2.4	Visualisation, correction d'une dromochronique	7
2.5	Calcul des vitesses et intercept times	8
2.6	Détermination de la vitesse vraie	9
2.7	Traces fantômes	11
2.8	Intercept times aux géophones ou méthode des délais.	12
2.9	Calcul de profondeur sous les géophones	15
2.10	Calcul des épaisseurs	16
2.11	Tracé du profil sismique	20
3	CONCLUSIONS	21
<i>Annexe 1</i>	<i>Vitesse sismique et ripabilité</i>	<i>22</i>
<i>Annexe 2</i>	<i>Mesures de profondeur</i>	<i>23</i>
<i>Annexe 3</i>	<i>Vitesses sismiques et propriétés de la matière</i>	<i>24</i>
<i>Annexe 4</i>	<i>Interprétation en fonction du nombre de tirs</i>	<i>26</i>

1 INTRODUCTION

Le principe de la sismique réfraction est l'étude des ondes de compression P, qui arrivent les premières et sont réfractées par les interfaces des terrains en profondeur. La loi de Snell explique la direction des rayons

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\text{Vitesse 1}}{\text{Vitesse 2}} \quad \text{Réfraction totale} \quad \sin \alpha = \frac{\text{Vitesse 1}}{\text{Vitesse 2}}$$



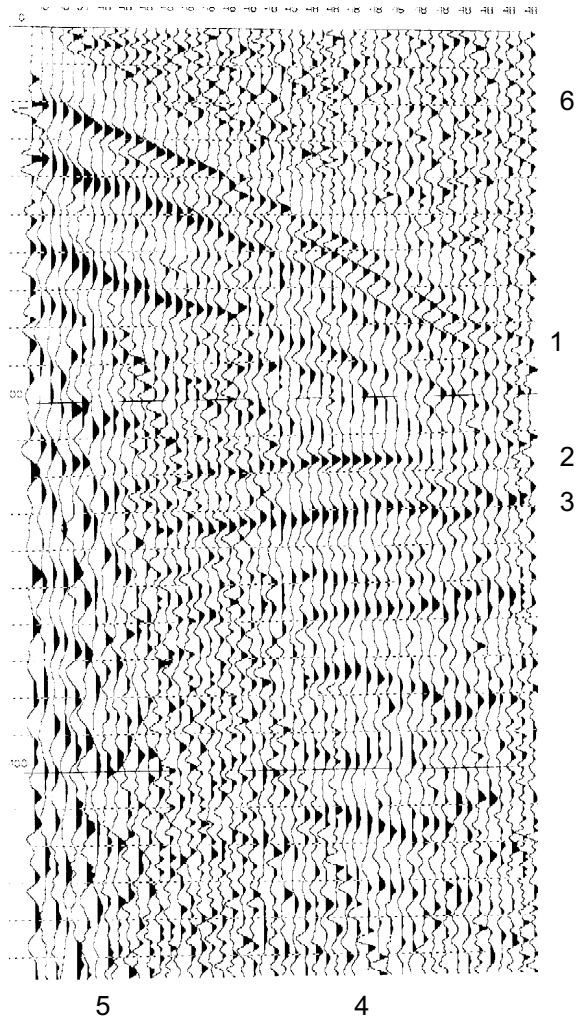
1.1 Acquisition des données

Sur le terrain, les ondes sismiques peuvent être produites:

1. à l'aide d'un marteau en frappant sur une plaque d'aluminium (peu performant sur des terrains meubles) ou directement sur l'asphalte (souvent très bon). Le marteau constitue une source d'énergie de bonne fréquence et facile à mettre en oeuvre.
2. avec un "fusil" tirant une cartouche de chasse calibre 12 à blanc dans le sol. Cette méthode est bonne en terrain meuble si le tir est effectué à une profondeur suffisante (environ 50 cm).
3. avec des amorces explosives enclenchées électriquement (système BETSY)
4. à l'aide de charges explosives (100 à 2000 g.) enterrées au moyen d'une perforatrice (type Cobra d'Atlas Copco). Ce faisant, on minimise les dégâts et le bruit tout en améliorant sensiblement la transmission de l'énergie, en remplissant le trou avec de l'eau si nécessaire. Cette méthode permet une investigation profonde, mais est lourde à mettre en oeuvre, sans compter les problèmes légaux relatifs à l'usage de l'explosif.

Les enregistrements sont réalisés à l'aide de sismographes digitaux:

- ES-1225 de EG&G reliés à un ordinateur type PC-compatible
- ES-2401 de EG&G 24 canaux
- StrataView de EG&G, de 24 à 60 canaux
- Bison 5000, 7000
- ABEM TERRALOC



Premières arrivées

Fig.1.1 Enregistrement d'un « film » sismique

Par sécurité, les données des tirs sont tout d'abord imprimées sur papier, puis stockées sur des disquettes (12 traces occupant un peu plus de 25 Koctets, 48 traces jusqu'à 1 Moctets) ou sur le disque dur. Chaque soir, le contenu de celui-ci est transféré sur une bande magnétique (Streamer type Colorado ou autre).

1.2 Géométrie des dispositifs de sismique réfraction

Un dispositif classique comporte une ou deux "flûtes" totalisant de 120 à 480 mètres comprenant chacune 12 ou 24 géophones régulièrement espacés (5 à 20 m). On effectue:

- Deux tirs en bout de ligne à une demi-distance de géophone.
- Un tir au centre, au milieu du dispositif entre les deux flûtes généralement.
- Deux offsets à une distance variant en fonction de la profondeur de substratum et souvent égale à la moitié de la longueur du dispositif.
- Des tirs à l'intérieur de la flûte.

Les tirs supplémentaires à l'intérieur du dispositif entre deux géophones permettent d'améliorer considérablement la qualité de l'interprétation, mais augmentent le temps d'acquisition sur le terrain et celui de l'interprétation. Dans des régions difficiles comme c'est généralement le cas dans les massifs alpins, 7 à 11 tirs sont parfois nécessaires pour une bonne compréhension de la géométrie des couches.

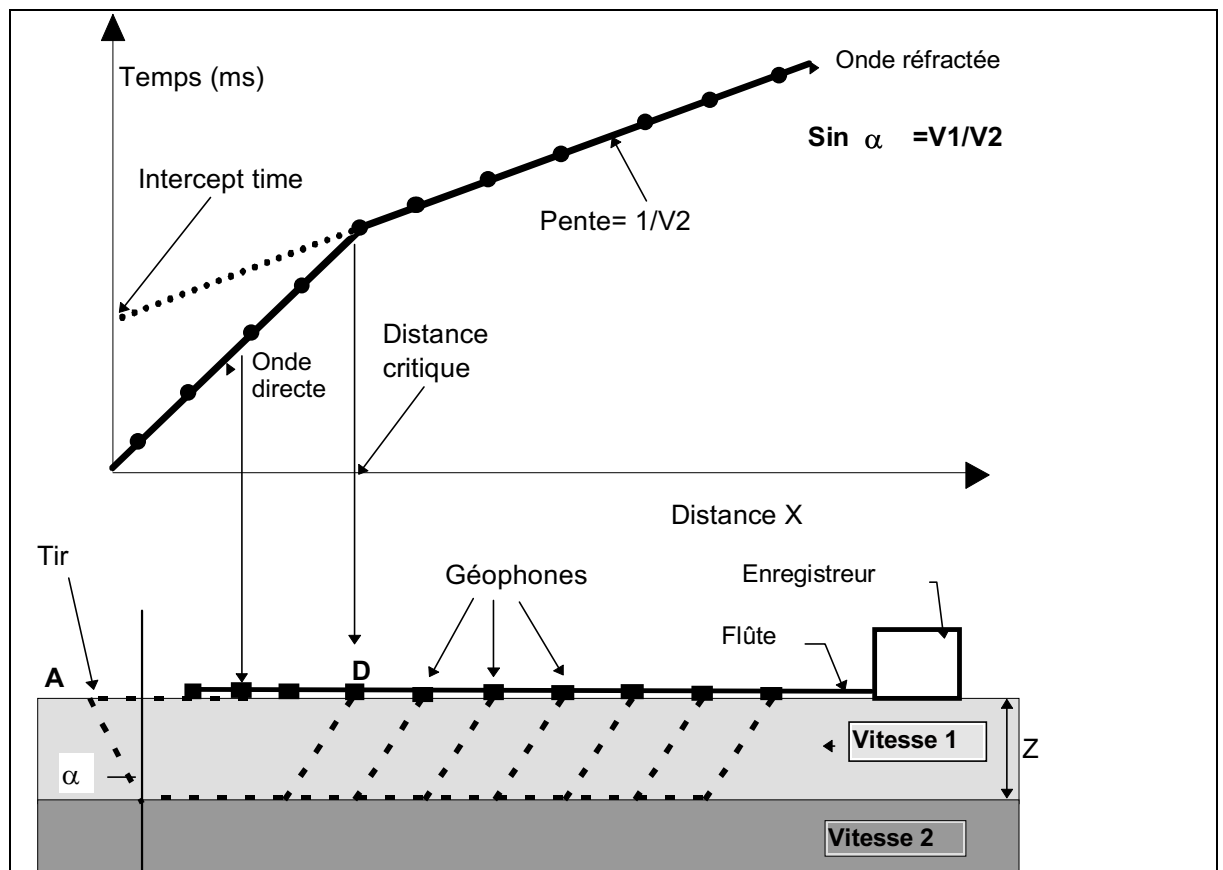


Fig 1.2 Schéma d'un dispositif de sismique réfraction

2. INTERPRETATION

2.1 Généralités

L'interprétation des données acquises sur le terrain a été faite à l'aide de logiciels développés par Géologie-Géophysique (programme **WinSism** sous Windows). Ce logiciel permet de pointer les "films" à l'écran, d'assembler les dromochroniques ainsi que d'effectuer graphiquement toutes les opérations usuelles: Translations de traces, calcul des *intercepts times*, calcul des épaisseurs et tracé du profil sismique.

2.2 Pointage des "films"

La méthode de la sismique réfraction se base sur le temps d'arrivée des ondes P que l'on peut déterminer sur les "films" enregistrés sur le terrain, ou sur l'écran de l'ordinateur. Cette dernière méthode permet d'augmenter l'amplitude de la trace (trace size) ou d'afficher seulement une partie du temps enregistré. **Un bon "pointage" des films conditionne une interprétation correcte.**

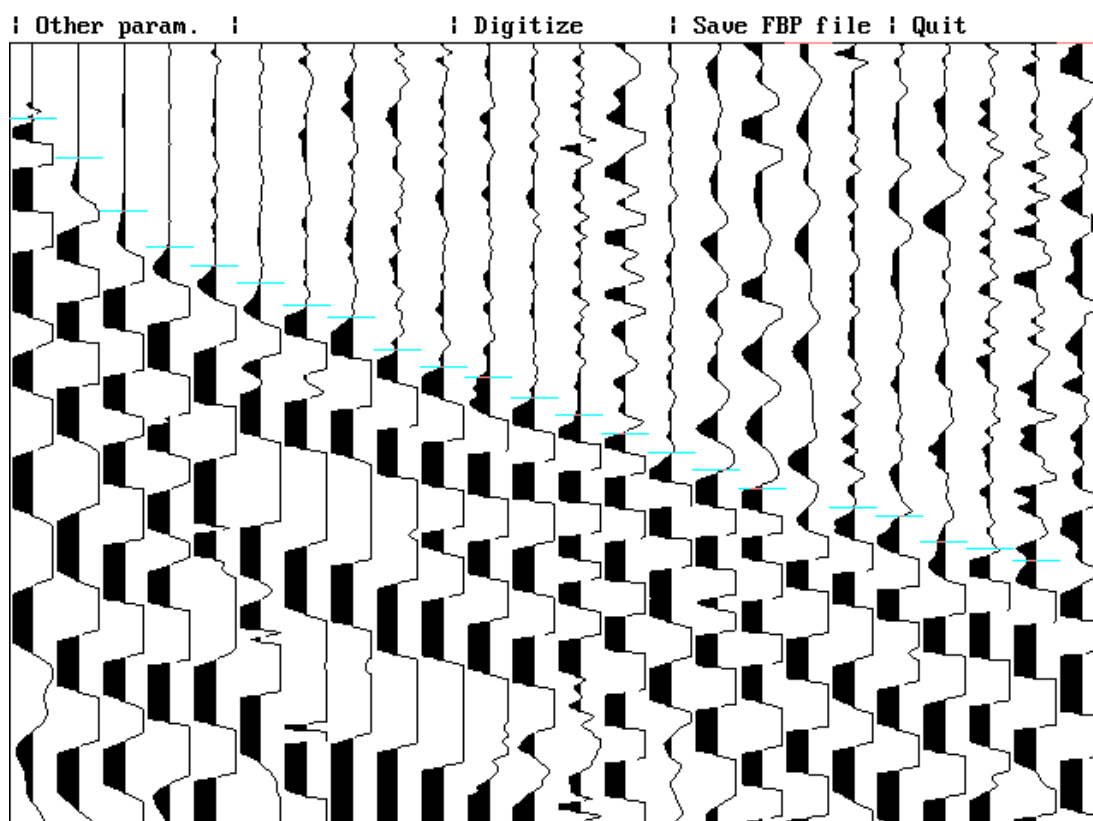


Fig 2.2 Film sismique et son pointage

2.3 Assemblage d'une dromochronique

Ayant pointé tous les tirs d'un dispositif, on assemble alors la **dromochronique**, diagramme distance-temps (*Travel Time Curve*). Ce diagramme sert de base à toute l'interprétation. Les distances (mètres) sont reportées en abscisse et les temps (millisecondes) en ordonnée (Fig. 2.4).

2.4 Visualisation, correction d'une dromochronique

Le fichier dromochronique créé est imprimé ou tracé sur plotter afin de vérifier la dromochronique. Les erreurs de pointage qui apparaissent sont alors corrigées en vérifiant les enregistrements de terrains.

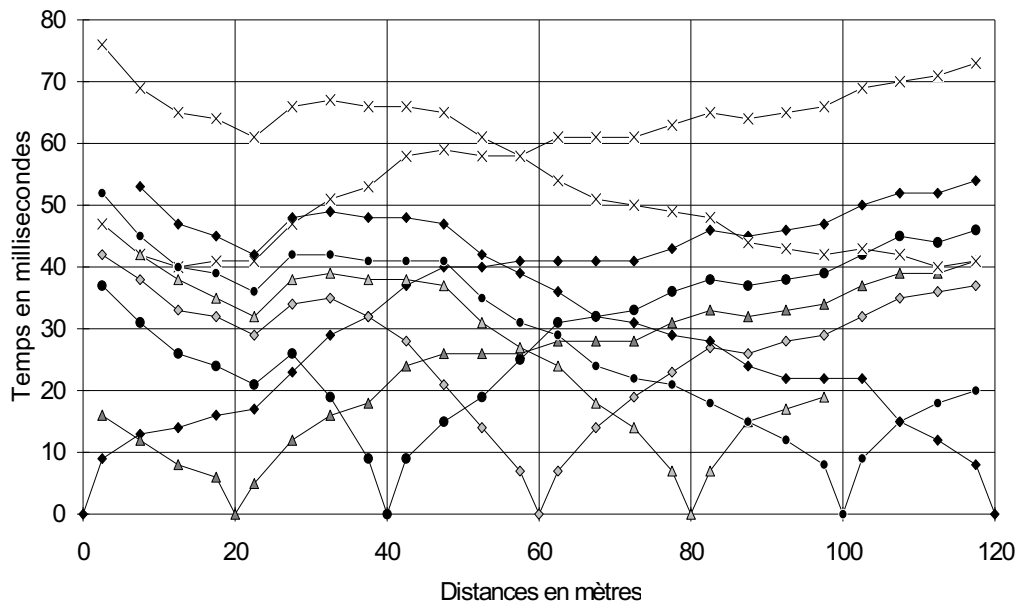
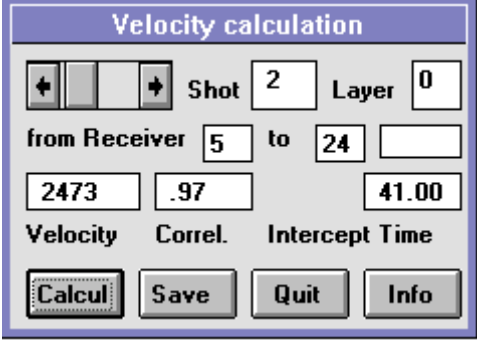


Fig 2.4. Dromochronique

2.5 Calcul des vitesses et intercept times

La vitesse en m/s correspond à l'inverse de la pente de la dromochronique (Time-distance curves) car il s'agit là d'un diagramme distances - temps.

Les programmes calculent la vitesse par régression linéaire et l'intercept time sur un tir sélectionné sur la portion de dromochronique désirée. La droite s'affiche à l'écran ainsi que l'écart type.



Velocity calculation

Shot 2 Layer 0

from Receiver 5 to 24

2473 .97 41.00

Velocity Correl. Intercept Time

Calcul Save Quit Info

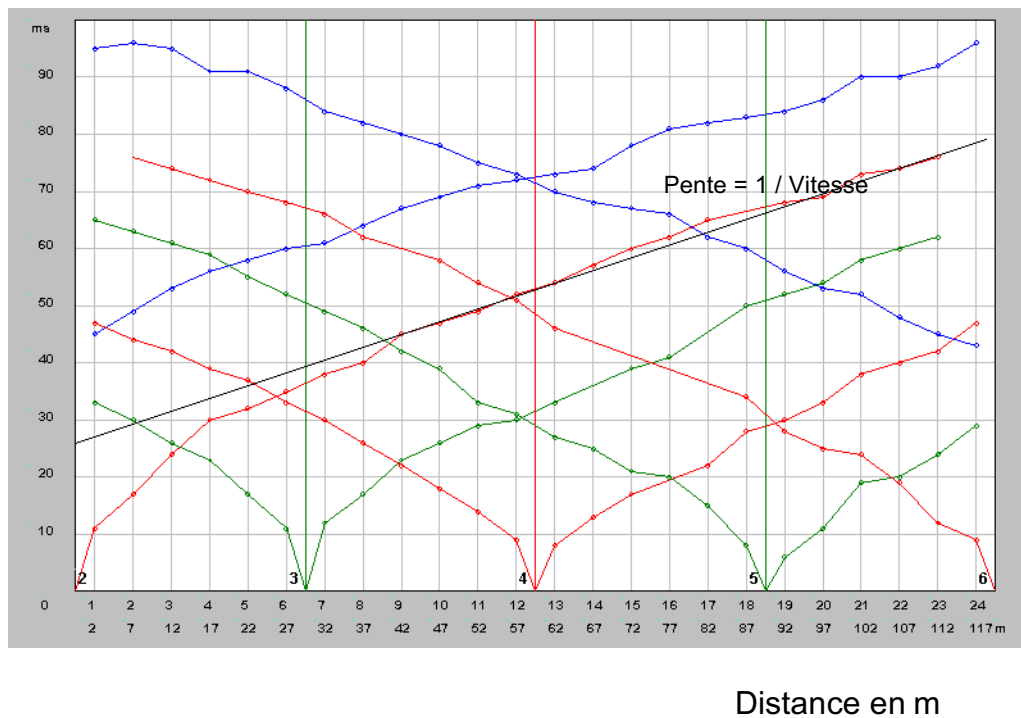


Fig 2.5 Affichage de la vitesse, de l'intercept et option de sauvegarde

2.6 Détermination de la vitesse vraie

La pente d'une dromochronique correspond à l'inverse de la vitesse du terrain traversé. Si le substratum est incliné, la pente du tir offset normal ne sera pas égale à celle du tir offset inverse. Pour déterminer la vitesse vraie d'un terrain, on "conjugue" alors les deux tirs.

Pratiquement, on reporte (CD) la moitié de l'écart de temps (AB) entre les premières arrivées des deux tirs offsets pour un même géophone par rapport à une ligne de référence temps arbitraire (TT'). On obtient, lorsque l'on a procédé ainsi pour tous les géophones, si le substratum est homogène et si l'enregistrement de l'onde des offsets ne touche que le substratum, des points alignés avec une pente correspondant à l'inverse de la vitesse réelle du substratum (ligne VV'). Ce procédé permet de supprimer les effets dus à l'inclinaison et aux ondulations du substratum. Si les points ne s'alignent pas, il faut vérifier si les premières arrivées ne proviennent pas d'un autre terrain ou revoir le "pointage" des premières arrivées. Une pente plus forte entre deux segments de droite peu inclinés peut être due à une zone lente (fracture, autre terrain). On peut évidemment conjuguer les parties correspondant à un même terrain de n'importe quels tirs.

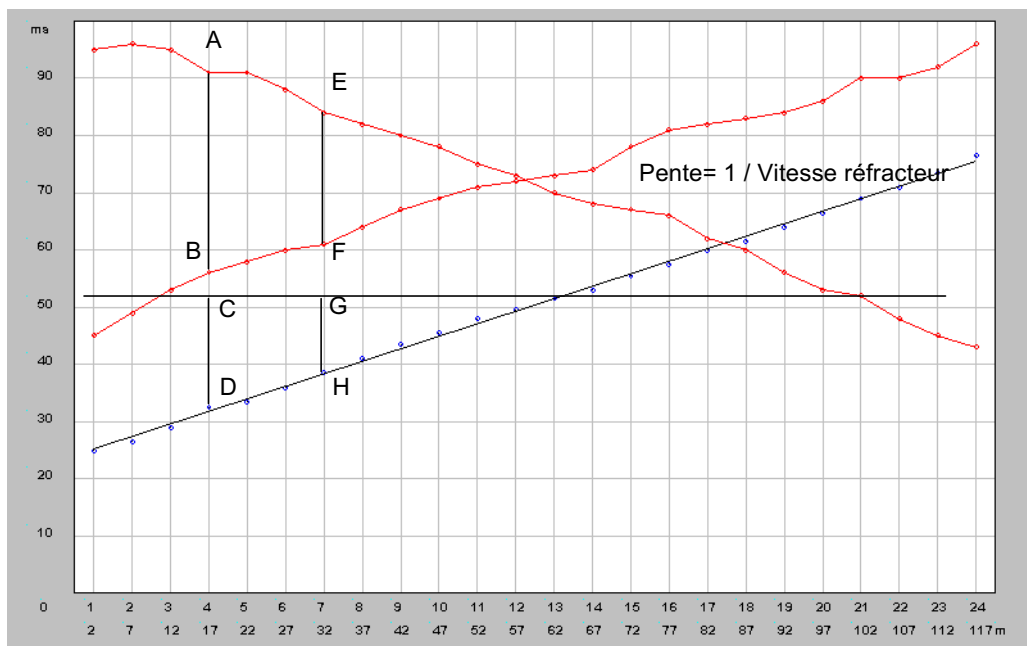


Fig 2.6 Conjugaison de deux offsets

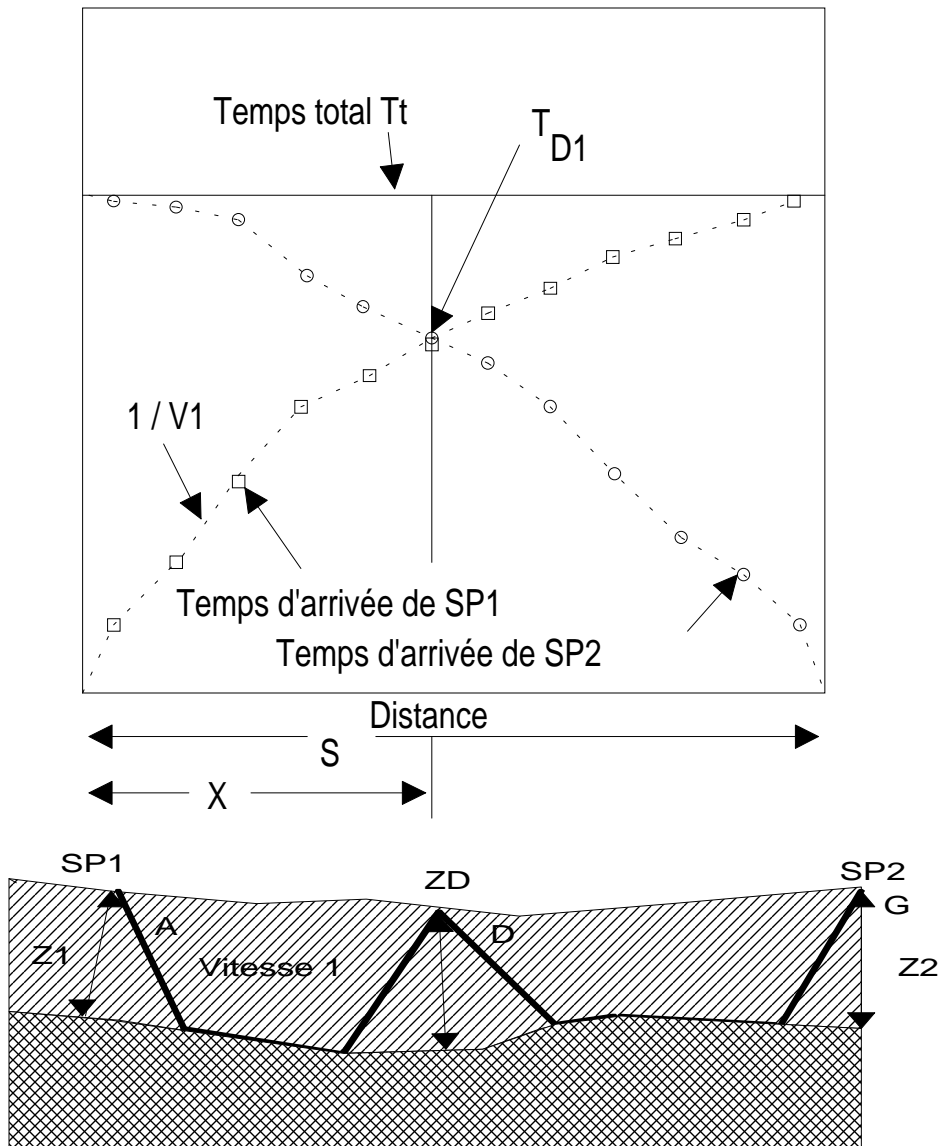
$$T_{D1} = \frac{Z_1}{V_1 \cos \alpha} + \frac{X - Z_1 \tan \alpha - Z_D \tan \alpha}{V_2} + \frac{Z_D}{V_1 \cos \alpha}$$

$$T_{D2} = \frac{Z_2}{V_1 \cos \alpha} + \frac{(S - X) - Z_2 \tan \alpha - Z_D \tan \alpha}{V_2} + \frac{Z_D}{V_1 \cos \alpha'}$$

$$(T_{D1} - T_{D2}) = \frac{Z_1 - Z_2}{V_1 \cos \alpha} + \frac{2X}{V_2} - \frac{S}{V_2} + \frac{Z_2 \tan \alpha - Z_1 \tan \alpha}{V_2}$$

$$(T_{D1} - T_{D2}) = \text{constante} + \frac{2X}{V_2}$$

X Les ondes doivent être réfractées sur le même terrain.



2.7 Traces fantômes

Il est souvent très utile de pouvoir superposer deux tirs, pour vérifier la correspondance entre deux parties de dromochroniques. Le cas le plus usuel est de faire coïncider aussi bien que possible la partie distale du tir offset sur le tir en bout pour déterminer quelle portion du tir en bout peut correspondre au substratum.

L'ordinateur permet de déplacer rapidement n'importe quel tir et de l'ajuster sur un tir préalablement choisi. La dromochronique peut être montée ou descendue, plus ou moins rapidement. L'ajustage effectué, se positionner sur l'intercept time obtenu, c'est à dire l'endroit où la trace translaturée recoupe l'axe du tir non déplacé (Point IT sur la fig. 2.7) et sauver cette valeur qui servira pour les calculs d'épaisseur. On peut déduire de la figure 2.7 que les premières arrivées du tir en bout proviennent du substratum du géophone 1 au géophone 20 ou 21.

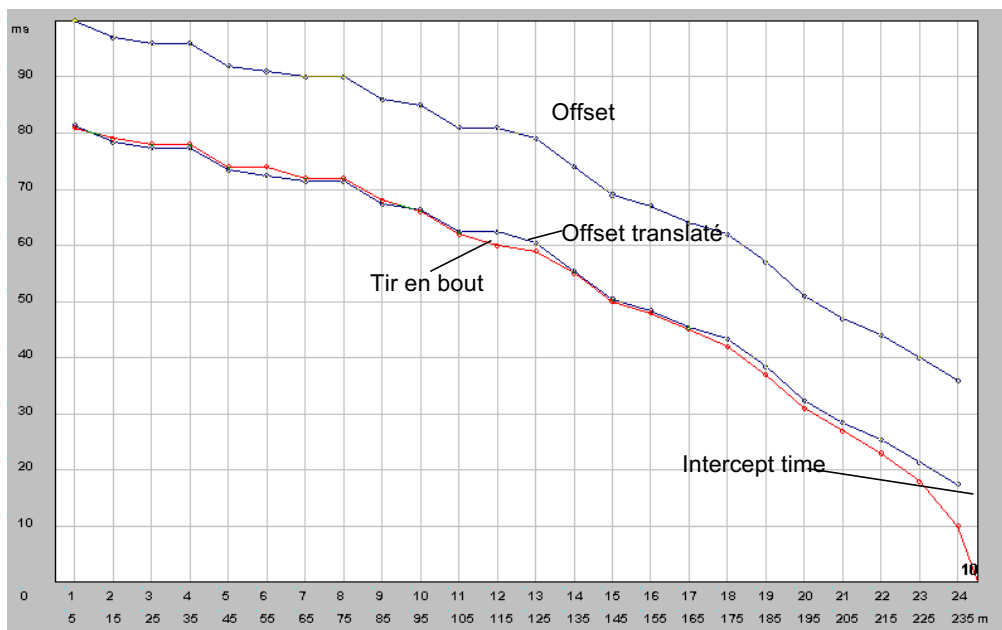


Fig 2.7 Offset superposé à un tir au bout.

2.8 Intercept times aux géophones ou méthode des délais.

Avec cette méthode on peut calculer la profondeur du substratum sous chaque géophone. L'ordinateur peut effectuer les diverses opérations de translation de dromochroniques et les calculs nécessaires pour obtenir l'intercept et les profondeurs à chaque géophone. La valeur des intercept times aux géophones donne immédiatement une idée de la profondeur relative du substratum sous les géophones.

Graphiquement, en translatant l'offset 1 sur l'extrémité du tir en bout 1 on peut reconstituer les arrivées "fantômes" sur le tir en bout. Le même procédé s'applique à l'offset 24 et au tir en bout 24. On obtient deux dromochroniques des tirs en bout avec la vitesse du substratum seulement.

Le temps total (T_t) est le temps que met l'onde P pour aller d'une extrémité à l'autre d'un dispositif sismique. Il se détermine facilement sur la dromochronique ainsi tracée. Le temps total du tir normal doit théoriquement être le même que celui du tir inverse (Trajet ABFG = GFBA).

Le temps de délai à un géophone (TD) correspond à la moitié du temps du trajet DCBA + DEFG auquel on retranche le temps total (Trajet ABFG). Ce temps est égal à $CD / V_1 - CD' / V_2$ (Fig 2.8).

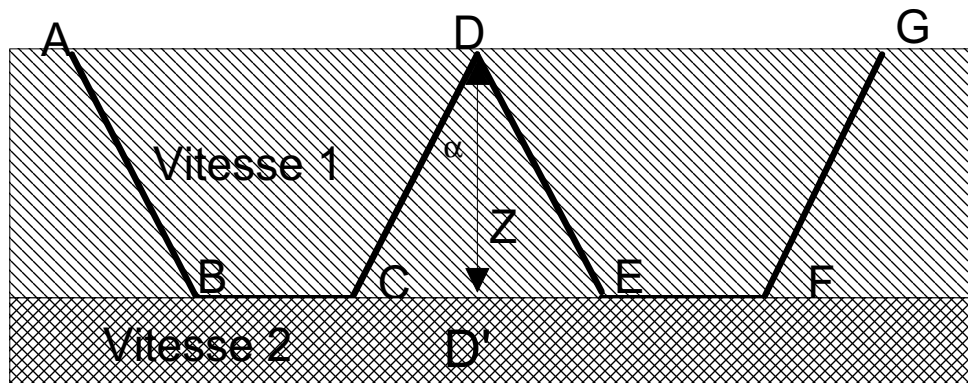


Fig 2.8 Schéma de l'intercept au géophone

Définition du temps de délai

$$T_D = \frac{CD}{V_1} - \frac{CD'}{V_2}$$

$$TD = \frac{Z}{V_1 * \cos \alpha} - \frac{Z * \tan \alpha}{V_2} = Z \left(\frac{1}{V_1 * \cos \alpha} - \frac{\sin \alpha}{V_2 * \cos \alpha} \right)$$

étant donné que $\sin \alpha = \frac{V_1}{V_2}$ $V_2 = \frac{V_1}{\sin \alpha}$

$$T_D = Z \left(\frac{1}{V_1 * \cos \alpha} - \frac{\sin^2 \alpha}{V_1 * \cos \alpha} \right)$$

étant donné que $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$, $TD = \frac{Z * \cos \alpha}{V_1} = \frac{Z * \cos \left(\sin^{-1} \frac{V_1}{V_2} \right)}{V_1}$

il devient $Z = \frac{T_D V_1}{\cos \left(\sin^{-1} \frac{V_1}{V_2} \right)}$

l'équivalence entre un temps de délai et un temps d'intercept est évidente.

Pour trouver le temps de délai, lorsque Z est inconnu, considérons d'une part le temps de trajet $DCBA$ et $DEFG$ d'autre part

$$\text{Temps } DCBA = \frac{DC}{V_1} + \frac{CB}{V_2} + \frac{BA}{V_1}$$

équivalent au temps $\frac{AD}{V_2} + TA + TD$

TA = temps de délai en A

TD = temps de délai en D

TG = temps de délai en G

$$\text{Temps } DEFG = \frac{DE}{V_1} + \frac{EF}{V_2} + \frac{FG}{V_1}$$

équivalent à $\frac{DG}{V_2} + TD + TG$

Faisons la somme des temps $DCBA + DEFG = \frac{AD}{V_2} + \frac{DG}{V_2} + TA + TG + 2TD$

On obtient $= \frac{AG}{V_2} + TA + TG + 2TD$

Considérons le temps total d'un trajet $ABFG = \frac{AB}{V_1} + \frac{BF}{V_2} + \frac{FG}{V_1}$

$= \frac{AG}{V_2} + TA + TG$

Retranchons ce temps total $ABFG$ de la somme $DCBA + DEFG$, on obtient:

$\left(\frac{AG}{V_2} + TA + TG + 2TD \right) - \left(\frac{AG}{V_2} + TA + TG \right) = 2TD$ Temps d'intercept

2.9 Calcul de profondeur sous les géophones

Après avoir déterminé les *Delay times*, on peut calculer la profondeur sous chaque géophone pour un, deux, ou trois terrains plus le substratum. Pour cela, il faut connaître la vitesse des différents terrains et les *intercept times* (IT) pour chaque géophone.

Dans le cas d'un seul terrain sur un substratum, la profondeur sous un géophone (ZD) peut se calculer avec la formule:

$$ZD = \frac{TD * V_1}{\text{Cos}(\text{Sin}^{-1} V_1 / V_2)}$$

Les épaisseurs ($Z = Z_1 + Z_2$) sous un géophone sont calculées à l'aide des intercept time et avec les formules utilisées pour le calcul des épaisseurs aux points de tir (cf. Pages suivantes):

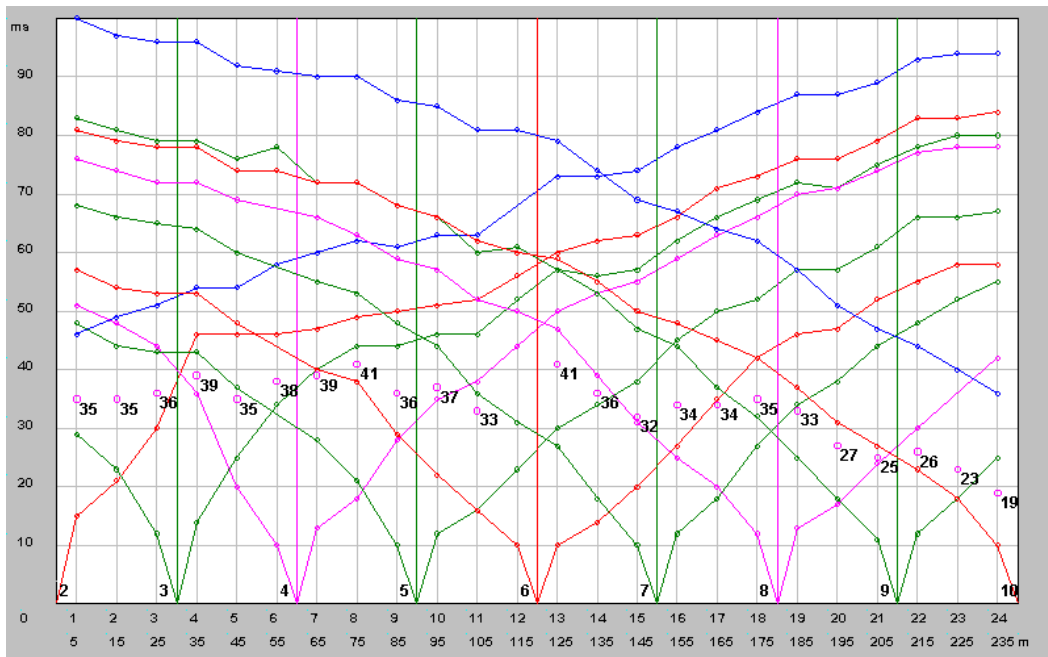


Fig. 2.9 Intercept times aux géophones

2.10 Calcul des épaisseurs

Le calcul des épaisseurs se fait selon la méthode classique des *intercept times* ou celle des points de brisure.

Pour calculer les épaisseurs avec la méthode des intercept times, il faut connaître le nombre de terrains, la profondeur du tir si l'on enterre les charges explosives, puis, les vitesses Amont / Aval en mètres/seconde et enfin les *Intercept times* en millisecondes, les formules utilisées figurent ci-après:

Z_1 = Epaisseur terrain 1 V_1 = Vitesse terrain 1 en m/s
 IT_1 = Intercept time 1 V_2 = Vitesse terrain 2 en m/s
 Prof = Profondeur du tir (pour les charges enterrées)

$$Z_1 = \frac{(IT_1) \times V_1}{2 \cos(\sin^{-1} V_1 / V_2)} + \frac{\text{Prof}}{2}$$

La formule utilisée pour le calcul d'épaisseur (Z) avec les distances critiques (di)

$$Z_1 = di / 2 * \text{SQR}((V_2 - V_1) / (V_2 + V_1))$$

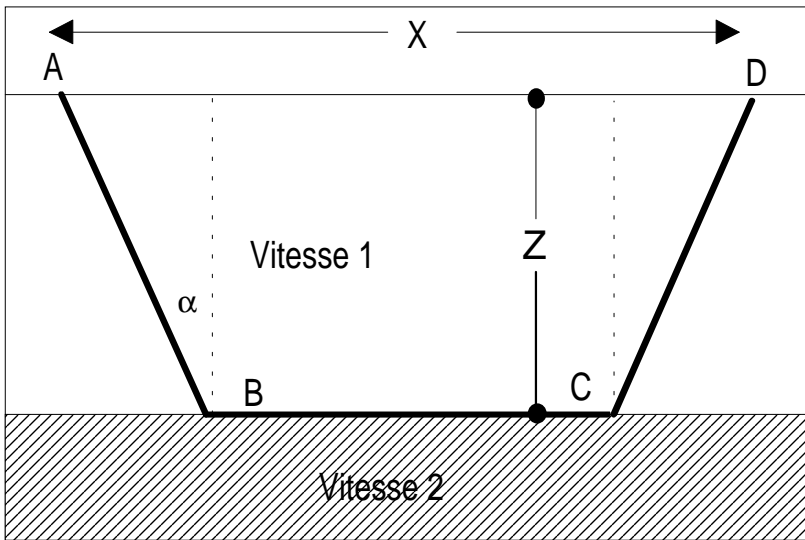
Cette dernière méthode est valable seulement pour des couches horizontales.

Loi de Snell

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2}$$

Réfraction totale

$$\sin \alpha = \frac{V_1}{V_2}$$



$$AB = CD = \frac{Z}{\cos \alpha}$$

$$BC = X - 2 * Z * \tan \alpha$$

$$T = \frac{AB + CD}{V_1} + \frac{BC}{V_2}$$

$$T = \frac{2 * Z}{V_1 * \cos \alpha} + \frac{X - (2 * Z * \tan \alpha)}{V_2}$$

$$T = 2 * Z \left(\frac{1}{V_1 * \cos \alpha} - \frac{\sin \alpha}{V_2 * \cos \alpha} \right) + \frac{X}{V_2}$$

$$T = 2 * Z \left(\frac{V_2 - V_1 * \sin \alpha}{V_1 * V_2 * \cos \alpha} \right) + \frac{X}{V_2}$$

$$T = 2 * Z * V_1 * \left(\frac{\frac{1}{V_1 * V_2 * \cos \alpha} - \sin \alpha}{V_1 * V_2 * \cos \alpha} \right) + \frac{X}{V_2}$$

$$T = 2 * Z * V_1 * \left(\frac{1 - \sin^2 \alpha}{V_1 * V_2 * \sin \alpha * \cos \alpha} \right) + \frac{X}{V_2}$$

$$T = 2 * Z * \left(\frac{V_2 - V_1 * \sin \alpha}{V_1 * V_2 * \cos \alpha} \right) + \frac{X}{V_2}$$

$$T = \left(\frac{2 * Z * \cos^2 \alpha}{V_2 * \sin \alpha * \cos \alpha} \right) + \frac{X}{V_2}$$

On peut substituer $V_1 = V_2 * \sin \alpha$

$$T = \left(\frac{2 * Z * \cos \alpha}{V_1} \right) + \frac{X}{V_2}$$

Si l'on fixe arbitrairement $X=0$, on prends alors les temps sur l'axe du point de tir, temps appelés *Intercept times* (T_{i1}).

$$Z = \left(\frac{T_{i1} * V_1}{2 * \cos \alpha_1} \right)$$

$$Z = \left(\frac{T_{i1} * V_1}{2 * \cos \left(\sin^{-1} \frac{V_1}{V_2} \right)} \right)$$

Les formules simplifiées (valables pour des contrastes de vitesses importants) permettent de calculer les épaisseurs des seconds (Z_2) et troisièmes terrains (Z_3) si on connaît les différences de temps entre les intercept times 1 et 2 (ΔT_{12}) et les intercept times 2 et 3 (ΔT_{23}).

$$Z_2 = \left(\frac{\Delta T_{i2} * V_2}{2 * \cos \left(\sin^{-1} \frac{V_2}{V_3} \right)} \right) \quad Z_3 = \left(\frac{T_{i23} * V_3}{2 * \cos \left(\sin^{-1} \frac{V_3}{V_4} \right)} \right)$$

Formules de calcul des épaisseurs (Z)

cas de couches pentées

$$Z_1 = \left(\frac{T_1 * V_1}{2 * \cos i_{1,2}} \right)$$

$$i_{1,2} = \frac{1}{2} \sin^{-1} \frac{V_1}{V_{2aval}} + \frac{1}{2} \sin^{-1} \frac{V_1}{V_{2amont}}$$

$$Z_2 = \left(\frac{(T_2 - T_{1,3}) * V_2}{2 * \cos i_{2,3}} \right)$$

$$Z_3 = \left(\frac{(T_3 - T_{1,4} - T_{2,4}) * V_3}{2 * \cos i_{3,4}} \right)$$

$$Z_4 = \left(\frac{(T_4 - T_{1,5} - T_{2,5} - T_{3,5}) * V_4}{2 * \cos i_{4,5}} \right)$$

$$i_{jk} = \sin^{-1} \frac{v_j}{v_k}$$

$$T_{1j} = \frac{Z'_1}{v_1} * 2 * \cos i_{1j}$$

$$T_{jk} = \frac{Z_j}{v_j} * 2 * \cos i_{jk} \dots j \neq 1$$

 $T_1, T_2 \dots$ Ordonnées à l'origine (temps d'intercept)

Profondeur du point de tir = P

Majorer les profondeurs de P/2

$$Z_1 = \left(Z'_1 + \frac{P}{2} \right) \text{ (majorer l'épaisseur du premier terrain seulement).}$$

2.11 Tracé du profil sismique

Après avoir calculé l'épaisseur pour tous les tirs (offsets exceptés bien évidemment), on représente le résultat en deux dimensions à l'écran ou sur papier. Des arcs de cercles de rayons proportionnels aux profondeurs des divers terrains sont tracés tout d'abord avec les vitesses correspondantes. Si l'on connaît l'altitude des tirs et/ou des géophones, le relief peut être restitué. L'interpréteur doit alors relier les arcs de cercles, selon des critères géométriques et géologiques. Il ne faut jamais oublier que la profondeur calculée est la distance la plus courte à un terrain, et non la distance verticale. Ceci est particulièrement important dans les Alpes où les pentes peuvent être fortes (cf. annexe 2)

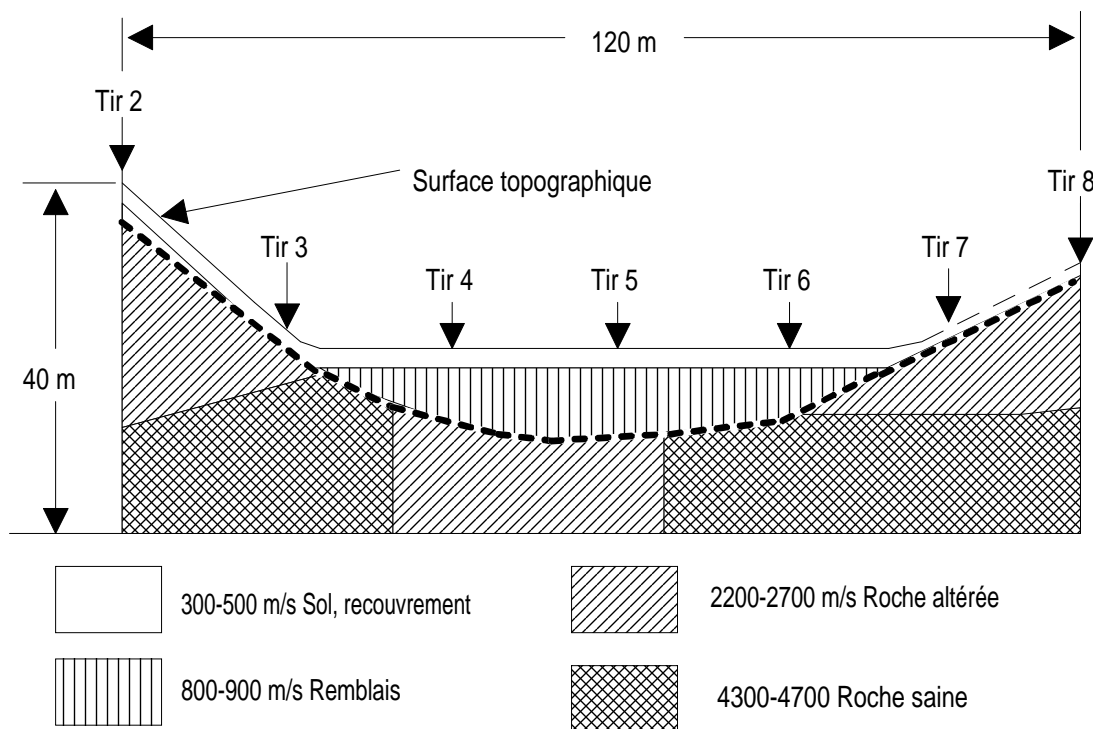


Fig 2.11 Profil sismique

3 CONCLUSIONS

L'ingénieur est souvent intéressé à connaître la profondeur du substratum rocheux, or celui-ci présente le plus souvent un contraste de vitesse important avec le recouvrement, ce qui favorise sa détection par sismique réfraction. Les vitesses sismiques renseignent bien sur la nature des terrains de recouvrement et du substratum. Par expérience, la précision des calculs de profondeur par sismique réfraction est d'environ 10%, si la qualité des enregistrements est satisfaisante.

La méthode de sismique réfraction présente quelques limitations inévitables:

- La vitesse des terrains doit augmenter de la surface vers la profondeur. Un terrain superficiel rapide, comme une croûte calcaire (caliche ou cap rock) amènera toujours plus rapidement les ondes directes aux géophones que les ondes réfractées en profondeur .
- Dans une vallée très encaissée, l'onde peut arriver par les flancs de la vallée plutôt que par le fond de celle-ci, si la profondeur est plus importante que la plus courte distance à un flanc (Fig. 3.1). Dans ce cas, la profondeur sera obtenue par défaut.

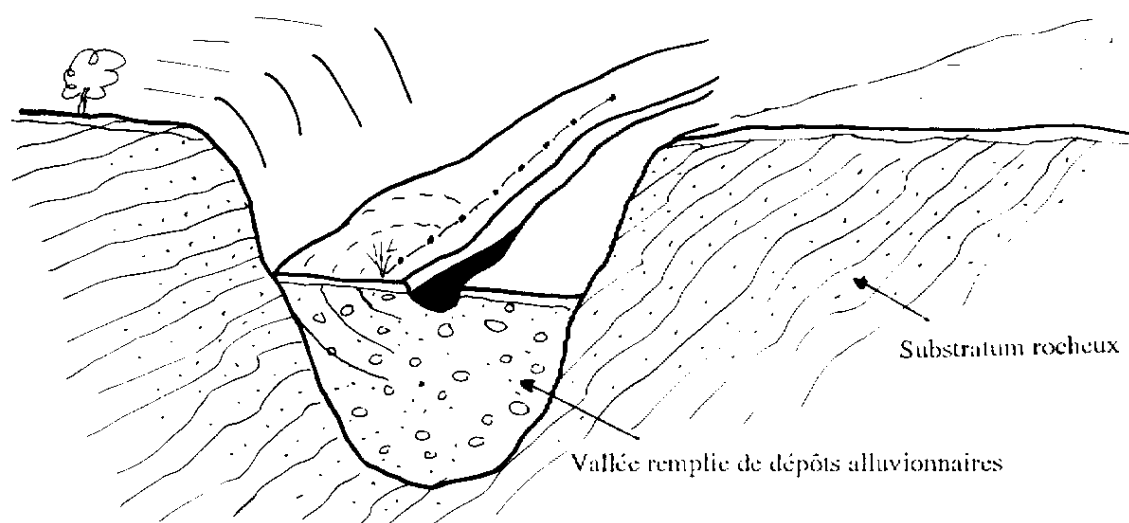


Fig 3.1 Sismique réfraction dans une vallée encaissée

Annexe 2 Mesures de profondeur

Chaque profil fait l'objet d'une coupe interprétative sur laquelle les différents terrains sont caractérisés par la vitesse de propagation de l'onde sismique.

Les ondes les plus rapides, arrivant les premières aux capteurs, sont utilisées pour l'interprétation. Ceci implique que ces ondes aient parcouru le chemin le plus court entre le point d'émission (point de tir) et les différents capteurs.

Par le calcul on obtient la distance D (Fig. A2.1) entre un point de la surface du sol et l'interface des terrains. Cette distance est en première approximation perpendiculaire aux interfaces. Elle est située sur une sphère centrée sur le point considéré. Il en découle que, généralement, à la verticale d'un point, les profondeurs H au substratum rocheux correspondent à celles dessinées sur les profils exécutés selon la ligne de plus forte pente (profils verticaux), mais peuvent être nettement plus élevées que celles qui sont dessinées sur les profils horizontaux.

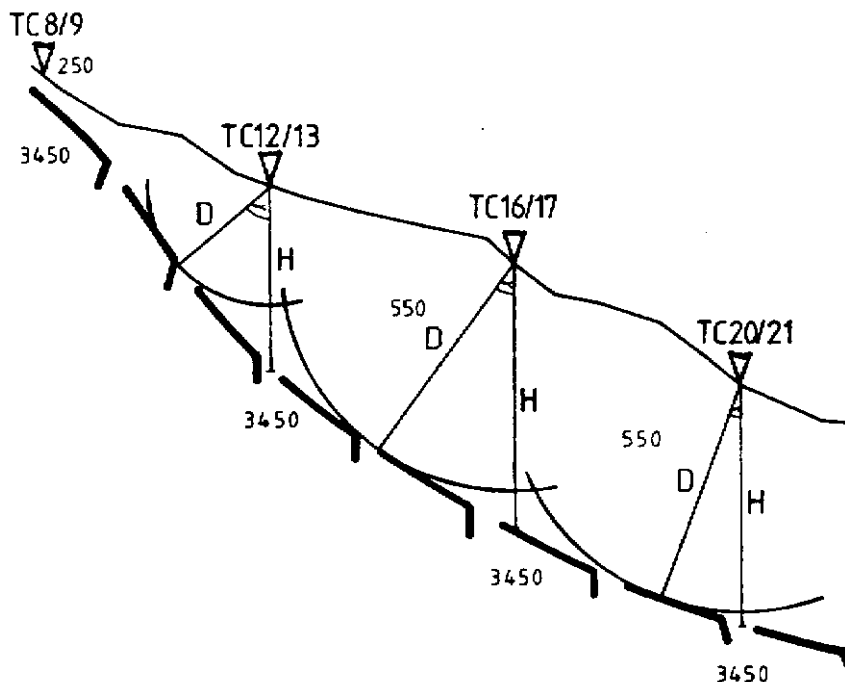


Fig A2.1

La distance D entre la surface du sol et la surface de séparation entre deux terrains est celle calculée et reportée sur les profils. Pour obtenir la profondeur verticale H , il faut diviser D par le cosinus α si l'on assimile la surface de séparation à un plan.

Annexe 3 Vitesses sismiques et propriétés de la matière

Matériel	Vitesse en m/s						
	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
Air 330 m/s	⊗						
Terrain de surface aérés	⊗						
Eboulis	⊗						
Graviers, sable sec	⊗						
Alluvions humides		⊗					
Vase 200 - 600 m/s	⊗						
Glace (3500 m/s)				⊗			
Eau (1460 m/s)		⊗					
Moraine		⊗					
Molasse			⊗				
Calcaire				⊗			
Gneiss, quartzite					⊗		
Granite						⊗	
Roches métamorphiques							⊗

Vitesses sismiques pour quelques terrains fréquents

La vitesse d'une roche diminue très rapidement si celle-ci est altérée ou fracturée. Si l'on détermine une vitesse sismique faible pour une roche apparemment compacte en surface, il faudra envisager avoir affaire à une masse glissée ou à des fractures en profondeur. Ceci est particulièrement intéressant pour l'étude des massifs rocheux sur des sites de barrages ou de tunnels.

Lorsqu'on provoque un ébranlement en surface, le mouvement initial se propage en profondeur sous forme d'ondes élastiques ou sismiques. Les vitesses de propagation longitudinale et transversale sont données par les formules:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{d(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

$$V_t = \sqrt{\frac{E}{d \times 2(1+\sigma)}}$$

E= Module d'élasticité de Young **d**=densité, **σ**= Coefficient de Poisson

V_p=Vitesse longitudinale **V_t**=Vitesse transversale

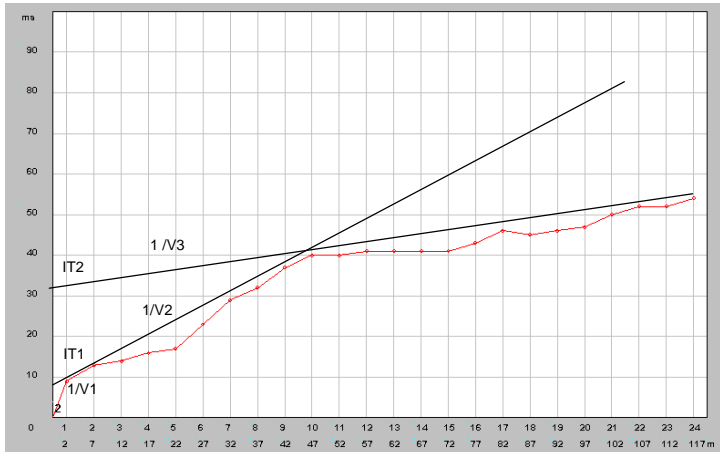
On voit sur ces formules que la vitesse est liée aux caractéristiques mécaniques de la roche, en particulier à son état de compacité ou de fracturation en place. Ces formules sont valables en milieu isotrope et parfaitement élastique.

Annexe 4 Interprétation en fonction du nombre de tirs

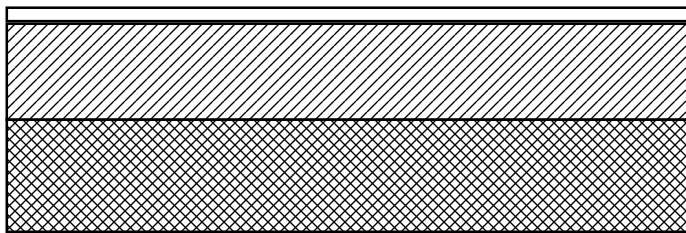
Introduction

Un dispositif de sismique réfraction classique comporte 24 géophones et un nombre variable de tirs. Le nombre de tir doit être adapté à la complexité du terrain. Si pour des couches horizontales un minimum de tir peut s'avérer suffisant, dans la plupart des cas un minimum de 5 tirs est nécessaire. Souvent plus de tirs s'avèrent indispensables si les conditions géologiques sont complexes.

Exemple d'interprétation d'un dispositif avec un seul tir



Le dispositif le plus simple ne comporte qu'un tir en bout, il est très rapide à exécuter mais ne donne de résultats corrects que lorsque les couches sont planes, homogènes et parallèles à la surface du sol. Il peut être utilisé en pédologie pour mesurer l'épaisseur



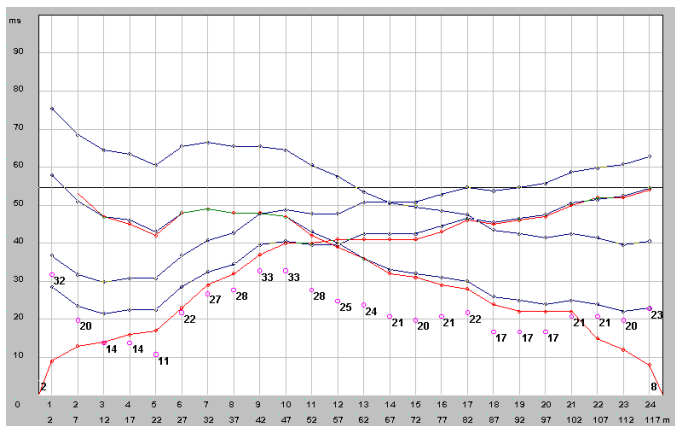
1.8 m à 250 m/s

17.6 m à 1600 m/s

Substratum à 4900 m/s

du sol en milieu alluvionnaire. Dans les autres cas, de loin les plus fréquents, il peut conduire à des erreurs d'interprétation très importantes.

Exemple d'interprétation d'un dispositif avec deux tirs

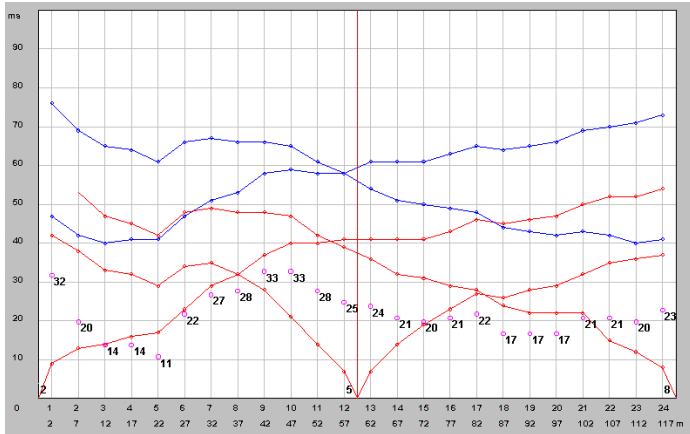


Ce dispositif comporte un tir à chaque extrémité des "flûtes". Dans les cas favorables, il est possible de calculer les vitesses par conjugaison des tirs amont et aval ainsi que les *intercept times* aux géophones dans la partie centrale, tout comme la vitesse vraie

du substratum par conjugaison.

Une interprétation en trois terrains a pu être effectuée, les vitesses et les intercept times connus, le calcul des épaisseurs est possible. Les temps des **intercepts** aux géophones sont en contradiction avec les *intercepts* aux points de tir et cela démontre que les conditions d'application de la méthode ne sont pas remplies.

Exemple d'interprétation d'un dispositif classique avec 5 tirs

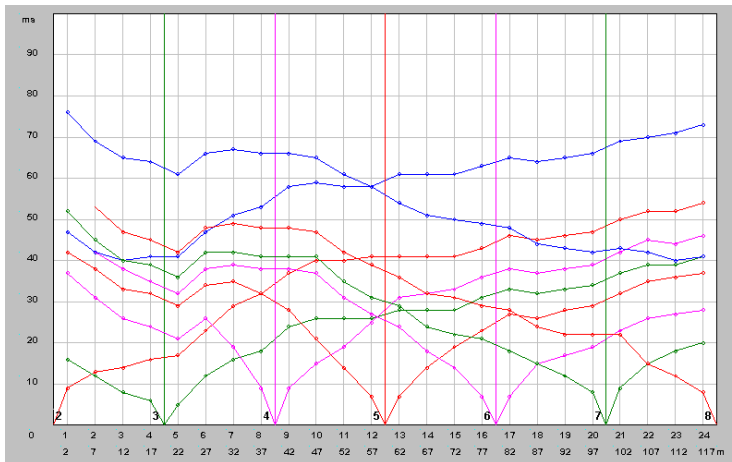


Ce dispositif classique donne de bons résultats lorsque les couches varient lentement et régulièrement en vitesse ou/et en épaisseur. Par translation des offsets, on détermine les temps d'intercept aux points de tir et sous tous les géophones,

ceci permettant de calculer la profondeur du bed rock sous chaque géophone. Selon l'interprétation, la profondeur du substratum peut varier du simple au double, en particulier si on n'avait pas le tir au centre pour nous indiquer la présence d'un second terrain épais et à 750 m/s.

Avec ces 5 tirs, l'interprétation devient plus élaborée par rapport aux interprétations précédentes. On peut mettre en évidence ainsi la présence d'un bed rock hétérogène, avec une zone lente au centre du dispositif.

Exemple d'interprétation d'un dispositif avec plus de 5 tirs



Dans les sites de montagnes, notre expérience montre que les vitesses ou les épaisseurs varient très rapidement, il faut alors disposer de tirs rapprochés pour pouvoir calculer pour chaque tir, par conjugaison des tirs amont et aval, les vitesses des premiers terrains et obtenir

une bonne détermination des profondeurs.

La réalisation de dispositifs avec un grand nombre de tirs permet d'obtenir des interprétations précises mais le temps nécessaire à l'acquisition des données sur le terrain augmente proportionnellement. L'interprétation demande également beaucoup plus de temps, et un compromis doit être trouvé entre l'objectif de l'étude lié à la complexité du site et les contingences économiques.