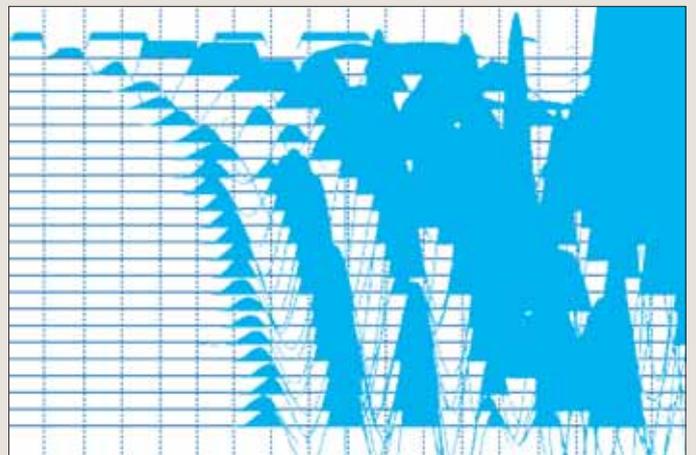


Les Cahiers de l'AGAP N°2



Guide Sismique réfraction

Olivier Magnin
Yves Bertrand



Sismique réfraction

Olivier MAGNIN
Yves BERTRAND

Les Cahiers de l'AGAP n° 2

Mars 2005



Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, boulevard Lefebvre - 75732 Paris Cedex 15

Réalisation

Les auteurs :

■ **M. Olivier MAGNIN**, Ingénieur géophysicien (EOPG Strasbourg, 1984), a consacré toute sa carrière aux techniques de géophysique appliquée au génie civil et plus particulièrement aux méthodes de mesures sismiques.

Il a été notamment responsable du département Géophysique de la Compagnie de Prospection Géophysique Française, ainsi que des sociétés GEODIA et FUGRO France, avant de créer en 2002 la société TERRASEIS, spécialisée dans les activités de conseil, de recherche et d'enseignement.

■ **M. Yves BERTRAND**, Ingénieur géologue ENSG (1959) a consacré sa carrière aux techniques de la géophysique appliquées au génie civil et plus particulièrement aux méthodes sismiques, électriques et à la gravimétrie.

Il a été notamment responsable des activités de sismique réfraction à la CPGF (1967-1988), puis directeur de la SEGG (1988-1995).

Il a participé à la rédaction de l'ouvrage « Génie parasismique » édité sous la direction de M. V. DAVIDOVICI sous le patronage de M. H. TAZIEFF.

Diffusion

Ce document est disponible au :
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
IST-Diffusion des Éditions
58, boulevard Lefebvre
F-75732 Paris Cedex 15
Téléphone : 01 40 43 50 20
Télécopie : 01 40 43 54 95
Internet : <http://www.lcpc.fr>

Prix

32 euros HT

En couverture : Enregistrement sismique.

Ce document est propriété du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation de son Directeur général
(ou de ses représentants autorisés)

© 2005 - LCPC

ISBN : 2-7208-0385-4

SOMMAIRE

Remerciements	4
Avant-propos	4
Introduction	5
Chapitre 1. Rappel des notions fondamentales	7
Chapitre 2. Mise en œuvre et matériel	17
Chapitre 3. Interprétation des résultats	35
Chapitre 4. Applications - Cas concrets	55
Conclusions	67
Bibliographie	68
ANNEXE 1. Bloc sismique	71
ANNEXE 2. Mesures <i>in situ</i> des paramètres dynamiques du sol	74
ANNEXE 3. La sismique aquatique	77
ANNEXE 4. Compléments sur l'interprétation des dispositifs sismiques	81

REMERCIEMENTS



Nous tenons à exprimer notre gratitude aux sociétés ou organismes chez qui nous avons pu trouver les exemples d'applications présentés dans cet ouvrage :

- *Société du tunnel du Fréjus et Scetauroute pour l'étude du Lac du Viviers réalisée sur le projet de l'A43,*
 - *CETE Méditerranée et le Centre d'Étude des Tunnels pour la reconnaissance réalisée sur le projet du nouveau tunnel de Tende,*
- et plus personnellement MM. Gérald Clément, Yves Lemoine, Viviane Borne et Antoine Bouvier pour la relecture de notre manuscrit et pour leurs observations pertinentes.*

AVANT-PROPOS



Le présent « Cahier » a été rédigé à l'initiative de l'AGAP Qualité (Association pour la qualité en géophysique appliquée). Il s'agit du deuxième exemplaire d'un ensemble de fascicules thématiques constituant un transfert d'expérience et traitant chacun d'une méthode ou d'un domaine d'étude.*

Le principe de ces monographies est de fournir aux prestataires en géophysique appliquée, ainsi qu'à leurs donneurs d'ordres, des ouvrages pratiques évitant les exposés trop théoriques. Les rédactions envisagées s'appuient donc sur des praticiens bénéficiant d'une large expérience dans leurs domaines d'intervention respectifs.

** AGAP Qualité est une association créée en 1992 par quatre organismes d'études géophysiques de subsurface :*

- *le BRGM (Bureau d'Études Géologiques et Minières),*
- *la CGG (Compagnie Générale de Géophysique),*
- *la CPGF (Compagnie de Prospection Géophysique Française),*
- *le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).*

AGAP Qualité regroupe à présent, au sein de plusieurs collègues, des donneurs d'ordres, des prestataires en géophysique, des fabricants de matériel et des scientifiques. Une des missions de l'AGAP Qualité consiste à promouvoir la bonne utilisation des méthodes de géophysique appliquée en terme de qualité du service rendu au client. La première action concrète de cette association a été de publier le « Code de Bonne Pratique ». Cet ouvrage comprend une série de 75 fiches présentant chaque technique géophysique, des tableaux d'adéquation « techniques - besoins », ainsi qu'un guide d'application de la norme ISO 9001 à l'activité géophysique. Il a été complété récemment par un guide de recommandation à l'usage des clients et des donneurs d'ordres afin de les aider dans la rédaction des documents contractuels et dans le suivi de la qualité des prestations qui leur sont proposées puis fournies. La série des « Cahiers de l'AGAP » vient donc compléter utilement ces documents généraux.

Coordonnées : AGAP Qualité, Maison de la géologie, 77 rue Claude Bernard, 75005 Paris
Tél : 01 46 07 27 96
email : secretariat@agapqualite.com

Au travers d'exemples variés, ils permettront aux géophysiciens d'éviter des erreurs dans la conception et l'organisation des opérations mais aussi d'améliorer la qualité des mesures et leur interprétation. Ils font également le point sur le matériel et sur les derniers développements en matière d'outils d'interprétation ou de modélisation. Par ailleurs, ils contribueront à éclairer les donneurs d'ordres sur les capacités et limites des techniques géophysiques vis-à-vis de cibles données.

Le président de l'AGAP Qualité

Bertrand HUBERT

Cette brochure est destinée à aider les maîtres d'œuvres et les prestataires de service dans la préparation, l'organisation, la réalisation et l'interprétation de la sismique réfraction.

Elle comprend deux parties :

La première partie (chapitres I à IV) aborde toutes les notions de base nécessaires pour acquérir les connaissances conduisant à une bonne mise en œuvre de la méthode sismique réfraction et également à un contrôle efficace des dossiers remis aux maîtres d'œuvres. Après un bref rappel des notions fondamentales permettant de mieux appréhender les principes physiques sur lesquels repose cette méthode, l'accent a été mis sur les aspects pratiques de mise en œuvre de cette technique, avant d'aborder le problème de l'interprétation des données.

La seconde partie est composée de quatre annexes qui abordent des problèmes d'interprétation particuliers et des mises en œuvres spécifiques de la sismique réfraction (bloc sismique, sismique marine) ou utilisant certaines propriétés de la propagation des ondes sismiques (détermination des modules dynamiques).

INTRODUCTION



Parmi les méthodes d'exploration du sous-sol, la sismique réfraction a pour vocation principale la reconnaissance des massifs rocheux dans le cadre des projets d'implantation d'ouvrages d'art, et ceci sous deux aspects fondamentaux :

- a - les études structurales dont l'objectif est la recherche et le suivi de l'évolution de la position du substratum sous une couverture meuble,*
- b - la caractérisation de l'état physique des diverses zones du massif rocheux par la connaissance des vitesses sismiques de chacune de ces zones.*

Ces études ont des applications très diverses, souvent en association avec d'autres techniques de reconnaissance, en particulier :

- analyse des propriétés mécaniques des massifs préalablement à l'édification des grands ouvrages de travaux publics (barrages, grands travaux, etc.),*

- *détermination des moyens de terrassement des massifs rocheux,*
- *étude des aquifères.*

Il est important de ne pas confondre la sismique réfraction, méthode adaptée aux reconnaissances à faible et moyenne profondeur (200 m maximum), avec la sismique réflexion, méthode sismique de base pour les reconnaissances à moyenne profondeur (au-delà de 30 à 50 m) et à très grande profondeur (plusieurs centaines voire milliers de mètres), qui met en jeu des moyens et des investissements incomparablement plus importants.

Cette différence est celle qui existe entre l'artisanat et la grande production industrielle. Il en résulte qu'en sismique réfraction le nombre très réduit d'intervenants impose à ceux-ci des connaissances très étendues en physique et en géologie. Dans la chaîne de production d'une mission de géophysique réfraction il n'existe quelquefois qu'un seul échelon qui assure la collecte des données et leur interprétation.

L'ingénieur géophysicien est la plupart du temps amené à prendre en charge les mesures, le traitement et l'interprétation géophysique des données, et enfin la traduction géologique ou géotechnique de cette interprétation.

Chapitre 1

Rappel des notions fondamentales



1.1. Principes généraux de la transmission des ondes	8
1.1.1. Ondes planes	8
1.1.2. Ondes de surface	9
1.1.3. Notions de base	9
1.2. Propagation dans les milieux discontinus	11
1.2.1. Cas d'un bicouche	11
1.2.2. Cas de plusieurs couches planes horizontales	13
1.2.3. Cas d'un seul marqueur plan incliné	14

Chapitre 1.

Rappel des notions fondamentales



1.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA TRANSMISSION DES ONDES

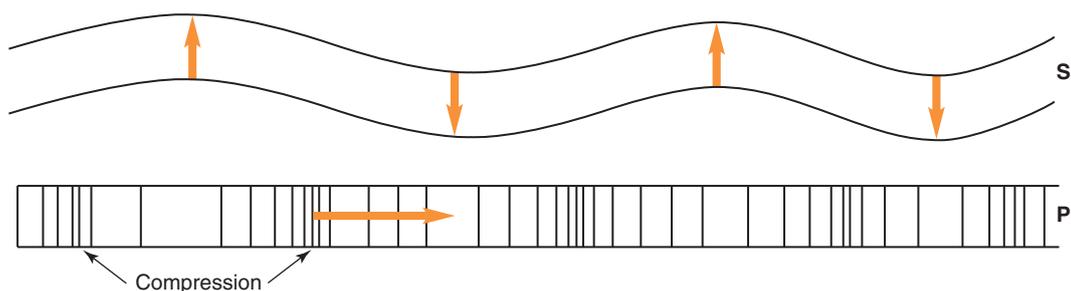
Les développements mathématiques de la théorie de l'élasticité et des équations d'ondes étant déjà largement explicités dans de nombreux ouvrages (*cf.* bibliographie), nous avons délibérément choisi de ne présenter qu'un bref rappel théorique des formules de base régissant les lois de la sismique réfraction.

Les vitesses sismiques, paramètres physiques utilisés en sismique réfraction, correspondent aux vitesses de transmission d'un ébranlement dans un milieu solide.

1.1.1. Ondes planes

La théorie de l'élasticité montre que sous l'effet d'une contrainte (ébranlement) les solides élastiques homogènes et isotropes subissent une déformation correspondant alors à deux types principaux d'ondes pouvant se déplacer soit longitudinalement (ondes de compression ou ondes P, vitesse V_p), soit transversalement (ondes de cisaillement ou ondes S, vitesse V_s). La figure 1 montre les déformations d'une lame d'un milieu soumis à ces deux types d'ébranlements.

FIGURE 1
DÉPLACEMENT ONDES P ET S.



On rappellera que :

$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ et $V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ où λ et μ sont deux coefficients appelés coefficients de Lamé (physicien français du XIXe siècle), et ρ la densité.

Le rapport des vitesses longitudinales et transversales est ainsi : :

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}}$$

où

λ et μ étant positif, ce rapport est au moins égal à $\sqrt{2}$.

En règle générale, dans les solides, λ et μ sont très voisins ; le rapport vaut alors $\sqrt{3}$. Dans les fluides il n'y a pas de cisaillement, $\mu = 0$.

Dans la pratique, on utilise plus généralement les paramètres suivants :

Module de cisaillement	$G = \mu$
Module d'Young	$E = 2\rho \cdot V_s^2 (1 + \nu)$
Coefficient de Poisson	$\nu = (V_p^2 - 2V_s^2)/2(V_p^2 - V_s^2)$.

1.1.2. Ondes de surface

Dans la réalité, le solide où se propage les ondes n'est jamais infini. Il existe alors deux autres types d'ondes qualifiées d'ondes de surface :

- ondes de Rayleigh se déplaçant dans le plan vertical de propagation et possédant à la fois une composante longitudinale et une composante transversale (assimilable à la houle),
- ondes de Love qui n'existent que si le milieu n'est pas homogène mais formé de couches superposées. Le mouvement n'a qu'une composante horizontale. Il faut donc disposer de capteurs horizontaux pour détecter ce type d'ondes.

Ces deux types d'ondes n'existent que près de la surface, leur amplitude diminuant exponentiellement avec la profondeur. Elles sont parfois exploitées, mais leur utilisation dans les études déborde largement du cadre de cet ouvrage.

1.1.3. Notions de base

Rappelons, sous la forme d'une simple énumération, les notions de base nécessaires à une bonne compréhension des interprétations et des applications de la sismique réfraction :

- les vitesses sismiques étudiées en réfraction sont les vitesses de déplacement de l'onde de compression qui a la particularité d'être la plus rapide. Cette onde arrivant toujours en premier sur les capteurs est ainsi aisément reconnaissable,
- les ondes sismiques sont d'un traitement assez délicat, et pour rendre aisée l'étude du mécanisme de leur propagation, la convention veut qu'on les représente par les

rayons sismiques qui leur sont orthogonaux, mais qui n'ont aucune existence physique (Fig. 2),

- les rayons sismiques ainsi définis suivent les mêmes lois que les rayons lumineux, en particulier les lois de la réflexion et bien sûr de la réfraction (lois de Descartes) (Fig. 3),
- une des particularités des lois de l'optique exploitée par la sismique réfraction est la *réfraction totale* qui est liée au fait que les ondes sismiques peuvent se propager horizontalement au toit d'une couche *plus rapide*, à condition que les rayons sismiques l'atteignent sous un angle d'incidence égal à l'angle de réfraction limite λ , ceci avant de remonter ensuite vers la surface avec le même angle d'émergence. Cette propriété se conçoit plus facilement si l'on considère non plus le rayon rasant, mais le tronçon de front d'onde qui se propage perpendiculairement à la surface de séparation des deux milieux.

Cette propriété est illustrée sur la figure 4 où λ est l'angle de réfraction limite atteint lorsque i_2 est égal à $\pi/2$ et tel que $\sin \lambda = V_1/V_2$.

FIGURE 2

REPRÉSENTATION DU RAYON SISMIQUE.

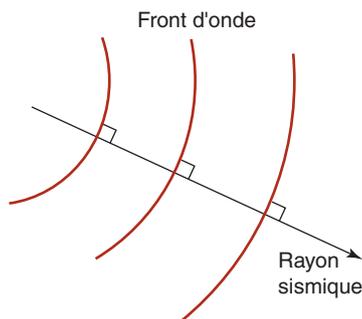


FIGURE 3

LOI DE SNELL - DESCARTES.

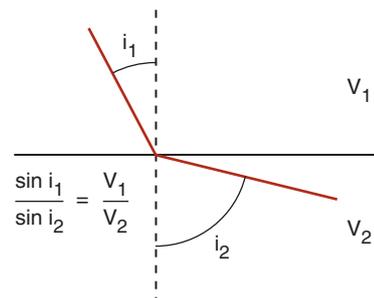
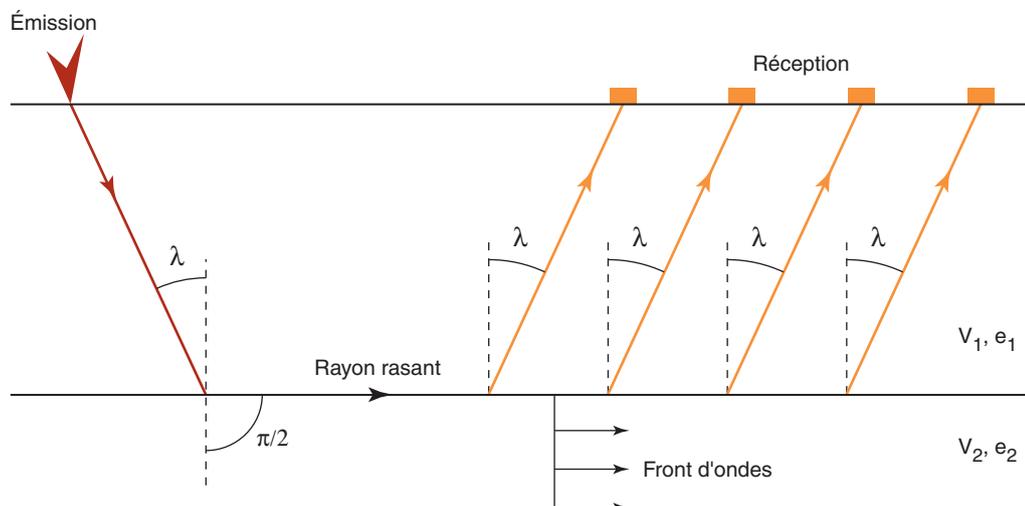


FIGURE 4

RÉFRACTION TOTALE - SCHÉMA DE PRINCIPE.



Il est intéressant de noter que plus le contraste de vitesse est grand, plus l'angle de réfraction limite est petit.

Exemple : $V_1 = 1000 \text{ m/s}$
 $V_2 = 5000 \text{ m/s}$ $\lambda = 11^\circ$
 $V_1 = 1000 \text{ m/s}$
 $V_2 = 2000 \text{ m/s}$, $\lambda = 30^\circ$

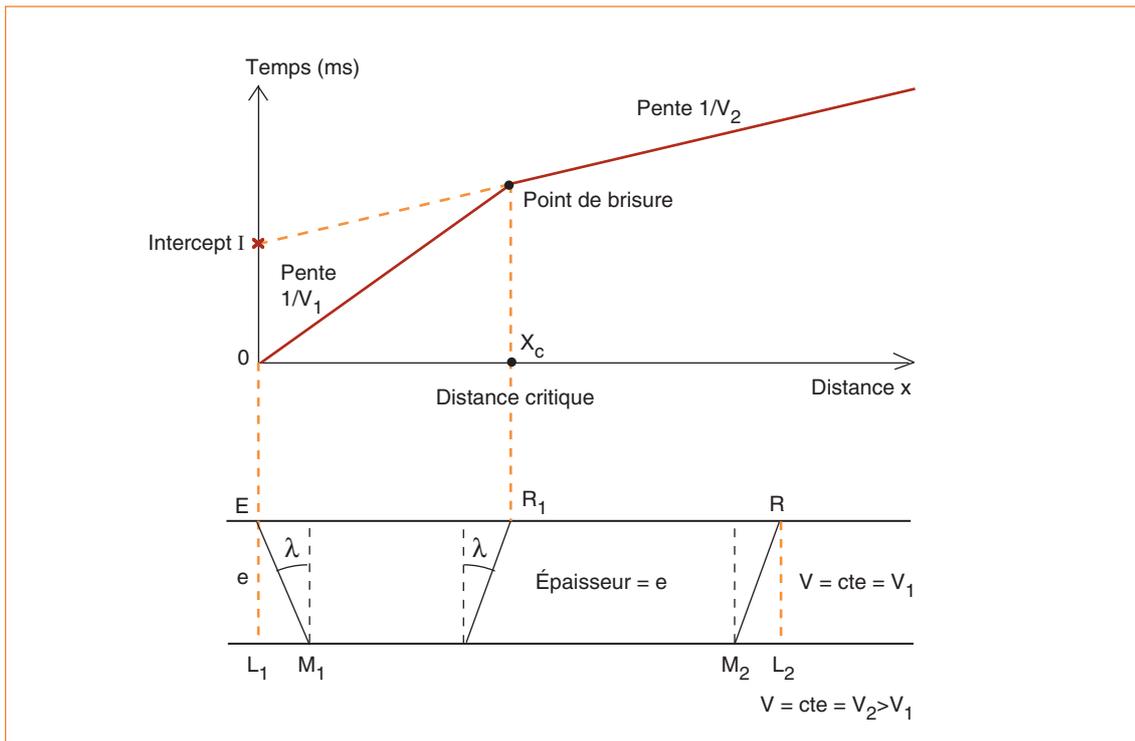
➤ le corollaire de cette propriété est que seuls sont théoriquement analysables les schémas pour lesquels les différentes couches ont des *vitesses croissantes en fonction de la profondeur*.

1.2. PROPAGATION DANS LES MILIEUX DISCONTINUS

1.2.1. Cas d'un bicouche

□ Calcul de l'équation donnant le temps d'arrivée de la réfractée première en fonction de la distance X entre le point d'émission et le récepteur dans le cas d'un bicouche composé d'une première couche lente de vitesse V_1 et d'épaisseur finie, reposant sur une couche d'épaisseur infinie de vitesse $V_2 > V_1$. Le graphique suivant « temps-distance » est appelé hodochrone ou dromochronique (Fig. 5).

FIGURE 5
CAS D'UN BICOUCHE.



$$T = \frac{EM_1 + M_2R}{V_1} + \frac{M_1M_2}{V_2}$$

$$L_1M_1 = e \cdot \operatorname{tg} \lambda = M_2L_2 \Rightarrow \frac{M_1M_2}{V_2} = \frac{X}{V_2} - \frac{2L_1M_1}{V_2}$$

$$T = \frac{2e}{V_1 \cos \lambda} + \frac{X - 2e \operatorname{tg} \lambda}{V_2}$$

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

$$T = \frac{2e}{V_1 \cos \lambda} + \frac{X}{V_2} - \frac{(2e \operatorname{tg} \lambda)}{V_1} \sin \lambda$$

$$T = \frac{X}{V_2} + \frac{2e}{V_1} \left(\frac{1}{\cos \lambda} - \operatorname{tg} \lambda \sin \lambda \right)$$

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

$$\cos^2 \lambda = 1 - \sin^2 \lambda$$

$$T = \frac{X}{V_2} + \frac{2e}{V_1} \cos \lambda$$

Cette dernière expression est l'équation d'une droite de pente $1/V_2$

et d'ordonnée à l'origine, ou intercept, $I = \frac{2 \cdot e}{V_1} \cos \lambda$.

Sur le graphique « temps-distance », les droites de pente $1/V_1$ et $1/V_2$ se croisent en un point appelé point de brisure. Pour les réceptions à gauche de ce point de brisure, le temps du trajet direct est inférieur au temps du trajet réfracté et inversement pour les réceptions situées à droite du point de brisure.

□ Calcul de l'épaisseur e

La branche de dromochronique permet de définir les vitesses V_1 et V_2 , inverses des pentes des droites, et par conséquent la valeur de λ , tel que $\sin \lambda = V_1/V_2$. L'intercept I permet alors de calculer l'épaisseur e de la couche.

$$e = \frac{I \cdot V_1}{2 \cdot \cos \lambda}$$

On peut calculer également l'épaisseur de la couche à partir de l'abscisse du point de brisure X_c ou distance critique.

$$e = \frac{X_c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

À titre d'information, le tableau I donne la distance critique pour un marqueur plan horizontal situé à 10 m de profondeur, cela en fonction du contraste de vitesse entre V_1 et V_2 .

TABLEAU I
CALCUL DES DISTANCES CRITIQUES

V_1	400	1600	2000	2500	3000
V_2	4500	4500	4500	4500	4500
X_c	22	29	32	37	45

Définition du délai sismique

Le *délai sismique* est par définition égal à la moitié de l'intercept.

Dans le cas présent, le délai du réfracteur V_2 est égal à $(e/V_1) \cos \lambda$. Cette notion de délai sismique est très importante et pourra être étendue à tous les schémas quel que soit le nombre de couches.

1.2.2. Cas de plusieurs couches planes horizontales (Fig. 6)

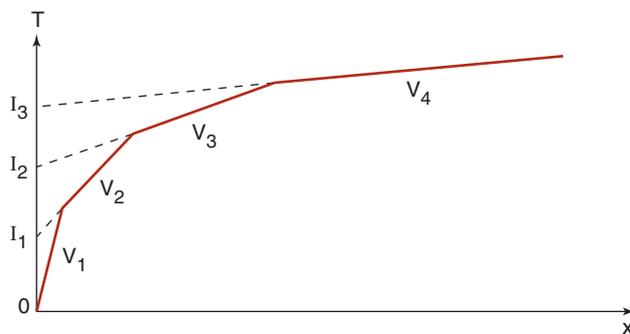


FIGURE 6
CAS DE PLUSIEURS COUCHES
PLANES HORIZONTALES.

e_1	V_1	
e_2	V_2	
e_3	V_3	
e_4	V_4	Avec $(V_1 < V_2 < V_3 < V_4)$

En exprimant de proche en proche, comme pour le cas de deux couches horizontales, les temps de trajets réfractés totalement à la surface des 2°, 3°, 4°, n° couche, on obtient autant d'équations de droites dont les paramètres sont les suivants :

- a - les inverses des pentes des diverses droites sont égales aux vitesses des réfracteurs correspondants ;
- b - les ordonnées à l'origine ou intercepts sont des fonctions des vitesses et des épaisseurs des diverses couches.

Si on admet les notations suivantes : $\sin i_{pn} = V_p/V_n$, les expressions des intercepts sont les suivantes :

Connaissant les vitesses $V_1, V_2, \dots, V_{n-1}, V_n$, les angles i sont par conséquent connus par leurs sinus et on calcule les épaisseurs $e_1, e_2, e_3, e_p, \dots$ de proche en proche.

$$I_1 = 2 \frac{e_1 \cos i_{1,2}}{V_1}$$

$$I_2 = 2 \frac{e_1 \cos i_{1,3}}{V_1} + 2 \frac{e_2 \cos i_{2,3}}{V_2}$$

$$I_3 = 2 \frac{e_1 \cos i_{1,4}}{V_1} + 2 \frac{e_2 \cos i_{2,4}}{V_2} + 2 \frac{e_3 \cos i_{3,4}}{V_3}$$

.....

$$I_{n-1} = 2 \frac{e_1 \cos i_{1,n}}{V_1} + 2 \frac{e_2 \cos i_{2,n}}{V_2} + \dots + 2 \frac{e_p \cos i_{p,n}}{V_p} + \dots + 2 \frac{e_{n-1} \cos i_{n-1,n}}{V_{n-1}} = 2 \sum_{p=1}^{n-1} \frac{e_p \cos i_{p,n}}{V_p}$$

La généralisation de la notion de délai sismique conduit à :

$$D_{n-1} = \sum_{p=1}^{n-1} \frac{e_p \cos i_{p,n}}{V_p}$$

Les épaisseurs de terrain e_1, e_2, e_3 pourront aussi être obtenues à l'aide des formules aux tangentes suivantes :

De façon générale, i_{pn} = angle qui a pour sinus la valeur V_p/V_n .

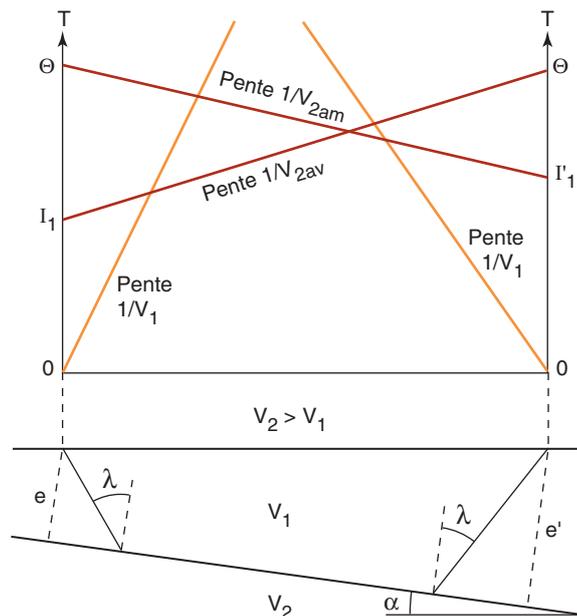
$$e_1 = \frac{I_1}{2} V_2 \operatorname{tgi}_{12}$$

$$e_2 = \frac{I_2}{2} V_3 \operatorname{tgi}_{23} - e_1 \frac{\operatorname{tgi}_{23}}{\operatorname{tgi}_{13}}$$

$$e_3 = \frac{I_3}{2} V_4 \operatorname{tgi}_{34} - e_2 \frac{\operatorname{tgi}_{34}}{\operatorname{tgi}_{24}} - e_1 \frac{\operatorname{tgi}_{34}}{\operatorname{tgi}_{14}}$$

1.2.3. Cas d'un seul marqueur plan incliné (Fig. 7)

FIGURE 7
CAS D'UN SEUL MARQUEUR PLAN INCLINÉ
(TIRÉE DU DICTIONNAIRE DE GÉOPHYSIQUE
APPLIQUÉE - P. CHAPEL, 1980).



V_{2am} représente la vitesse apparente pour les trajets se dirigeant vers l'amont du marqueur et V_{2av} la vitesse apparente pour les trajets se dirigeant vers l'aval.

Ces vitesses apparentes sont données par les relations :

$$\sin(\lambda + \alpha) = \frac{V_1}{V_{2av}}$$

$$\sin(\lambda - \alpha) = \frac{V_1}{V_{2am}} \quad \text{donc } V_{2am} > V_{2av}$$

$$\text{Il vient : } \frac{1}{V_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{V_{2am}} + \frac{1}{V_{2av}} \right) \frac{1}{\cos \alpha}$$

les angles de pendage étant généralement faibles, on peut négliger le facteur $1/\cos \alpha$ (très peu différent de 1), la formule approchée s'écrit alors :

$$V_2 = 2 \frac{V_{2am} \cdot V_{2av}}{V_{2am} + V_{2av}}, \text{ moyenne harmonique des deux vitesses apparentes.}$$

et

$$\cos \alpha = \frac{V_2}{2} \left(\frac{1}{V_{2am}} + \frac{1}{V_{2av}} \right)$$

Les distances perpendiculaires au marqueur : e et e' s'obtiennent simplement à partir des intercepts $I1$ et $I'1$:

$$e = \frac{V_1 I1}{2 \cos \lambda} \quad \text{et} \quad e' = \frac{V_1 I'1}{2 \cos \lambda}$$

Il est important de signaler qu'il suffit d'un très faible pendage pour faire évoluer très rapidement les valeurs des vitesses apparentes aval et amont.

Le tableau II montre cette évolution pour $V_1 = 2500$ m/s et $V_2 = 4500$ m/s.

Les valeurs négatives de la vitesse apparente amont traduisent le fait que les temps d'arrivée sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source d'ébranlement. Dans ce cas, pour le calcul de la vitesse vraie, la formule approchée de la moyenne harmonique écrite ci-dessus ne s'applique pas. La formule exacte avec introduction du facteur $\cos \alpha$ doit être appliquée. La valeur du pendage étant rarement connue, on devra alors passer par l'étude de la fonction Minus.

La figure 8 présente un exemple de vitesses négatives dans le cas d'un dispositif placé perpendiculairement à l'axe d'un sillon glaciaire.

TABLEAU II

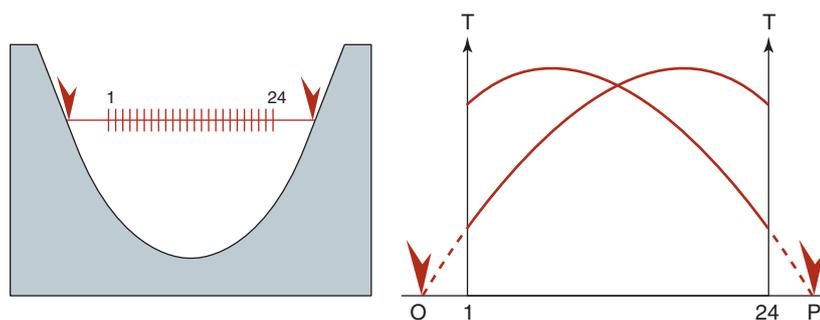
ÉVOLUTION DES VITESSES APPARENTES EN FONCTION DU PENDAGE

Pendage angle α	Vitesse apparente amont	Vitesse apparente aval	Moyenne harmonique exacte ($x \cos\alpha$)	Moyenne harmonique approchée	Écart (%)
0	4500	4500	4500	4500	0
5	5198	3994	4500	4517	0,38
10	6208	3615	4500	4569	1,54
15	7778	3325	4500	4659	3,53
20	10519	3100	4500	4789	6,42
25	16436	2924	4500	4965	10,34
30	38235	2787	4500	5196	15,47
35	- 114511	2682	4500	5493	22,08
40	- 22960	2604	4500	5874	30,54
45	- 12813	2549	4500	6364	41,42
50	- 8934	2515	4500	7001	55,57

Limite de validité de la formule approchée

FIGURE 8

VITESSES NÉGATIVES - CAS D'UN SILLON GLACIAIRE.



Chapitre 2

Mise en œuvre et matériel



2.1. Mise en œuvre	18
2.1.1. Remarque préliminaire	18
2.1.2. Réalisation d'un dispositif sismique	19
2.1.2.1. Nombre de capteurs et de tirs	19
2.1.2.2. Longueur du dispositif	20
2.1.2.3. Choix de la distance des tirs « offset »	21
2.1.3. Relevé topographique	22
2.1.4. Gestion du temps zéro	22
2.1.5. Conseils pratiques	23
2.1.5.1. Élaboration de l'offre	23
2.1.5.2. Mesures	24
2.2. Acquisition des données	25
2.2.1. Signal sismique	25
2.2.2. Enregistrement (film sismique)	26
2.2.3. Transformation du film sismique en document interprétable	27
2.3. Matériel	28
2.3.1. Capteurs	28
2.3.2. Enregistreurs	29
2.3.3. Sources	30
2.3.3.1. Explosif	30
2.3.3.2. Sources non destructives type chute de poids	31
2.3.3.3. Sources non destructives de type « fusil »	31
2.3.4. Flûtes sismiques	33
2.3.5. Système de déclenchement par radio	33

Chapitre 2.

Mise en œuvre et matériel



2.1. MISE EN ŒUVRE

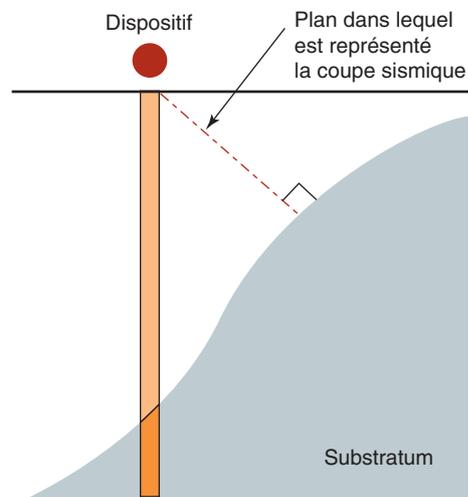
2.1.1. Remarque préliminaire

Il convient en premier lieu de préciser que la sismique réfraction, dans ses applications les plus classiques et les plus habituelles, est une méthode d'exploration linéaire du sous-sol. Les capteurs d'un dispositif sont alignés et le panneau ausculté est généralement situé à la verticale du dispositif.

En toute rigueur, il faut préciser que ce panneau est en réalité orthogonal aux couches. Lorsque la structure est complexe, il peut se faire que la surface auscultée soit gauche, mais cette anomalie n'est en aucun cas détectable, et on assimilera toujours le panneau ausculté à un plan moyen orthogonal aux couches.

Il est important de profiter de l'illustration de la figure 9 pour mettre en évidence le fait que l'implantation d'un sondage mécanique de calage doit prendre en compte l'effet dû au pendage du substratum.

FIGURE 9
PLAN D'INVESTIGATION D'UN PROFIL LINÉAIRE.



Un écart important entre la profondeur du toit du rocher mise en évidence par sondage mécanique et la coupe sismique peut parfois s'expliquer par un pendage important du substratum. C'est pour cela qu'il est important d'effectuer au moins deux profils perpendiculaires dans les secteurs où les pendages sont importants.

Ces dernières remarques n'empêchent pas d'imaginer des dispositifs où les capteurs seraient implantés selon un semis de points permettant une interprétation en 3D. Ce type de mise en œuvre nécessite des processus d'interprétation spécifiques, mais toujours basés sur les lois connues et invariables de la propagation des ondes sismiques (*cf.* annexe technique 1 sur le bloc sismique).

2.1.2. Réalisation d'un dispositif sismique

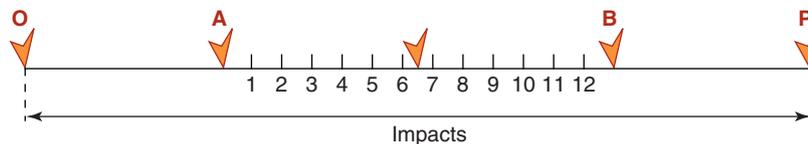
Les normes auxquelles doivent obéir les dispositifs sismiques sont exposées ci-après dans un but pratique. Les justifications théoriques détaillées de la nécessité de suivre ces normes sont exposées dans le paragraphe sur l'interprétation.

2.1.2.1 Nombre de capteurs et de tirs

Le dispositif le plus simple ci-après schématisé (Fig. 10) semble être le dispositif minimal, tant au point de vue du nombre de capteurs que du nombre de tirs, en-deçà duquel les informations fournies risquent de devenir très incertaines. Les tirs O et P, extérieurs au dispositif, sont appelés tirs offset ou tirs lointains. Les tirs A et B sont appelés tirs en bout et le tir C : tir au centre.

FIGURE 10

DISPOSITIF D'ACQUISITION MINIMAL.

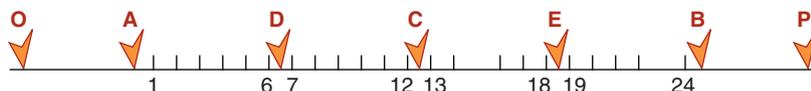


Le nombre de capteurs mis en place est généralement fixé par le nombre de voies dont dispose l'enregistreur, classiquement vingt-quatre voies sur les laboratoires de sismique réfraction.

Pour un dispositif de vingt-quatre capteurs le nombre de tirs dépend de l'homogénéité supposée du sous-sol et de la précision demandée. En se basant sur le dispositif minimal ci-dessus indiqué, il devient nécessaire pour vingt-quatre capteurs d'exploiter cette ligne de capteurs par cinq tirs, les deux tirs offset O et P, les tirs en bout A et B et un tir central C. Lorsqu'on risque de se trouver en présence de nombreuses et rapides variations latérales de faciès, on ajoute quelquefois des tirs intermédiaires D et E entre les capteurs 6 et 7 d'une part et 18 et 19 d'autre part (Fig. 11).

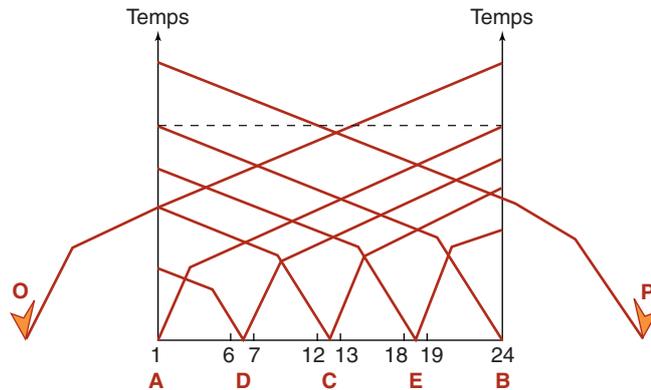
FIGURE 11

DISPOSITIF 24 TRACES - 7 TIRS.



Dans ce dernier cas, la dromochronique du dispositif pourra être la suivante (Fig. 12) :

FIGURE 12
DROMOCHRONIQUES ASSOCIÉES
À UN DISPOSITIF 24 TRACES - 7 TIRS.



2.1.2.2. Longueur du dispositif

La longueur du dispositif est la distance entre les deux tirs en bout, A et B, ou ce qui revient à peu près au même, la distance entre les deux capteurs extrêmes 1-12 ou 1-24.

Le choix de cette longueur va dépendre de la profondeur de la cible recherchée et des contrastes de vitesses existant entre les différents horizons sismiques intermédiaires (loi de vitesses du site).

La longueur du dispositif doit être assez grande pour qu'on puisse voir, au moins pour les ébranlements des deux tirs en bout A et B, une propagation au toit du substratum sur environ la moitié de la longueur du dispositif, soit six ou douze capteurs.

Dans l'hypothèse où l'on dispose d'un minimum de renseignements sur la géologie prévisible du site, une bonne approche est de se servir de la formule de calcul de la distance critique ou point de brisure.

Nous avons vu précédemment (cf. Chapitre 1, paragraphe 1.2. *Propagation dans les milieux discontinus*) que la distance critique : X_c , c'est-à-dire la distance par rapport au point de tir à partir de laquelle on pointe la réfractée au toit du milieu de vitesse V_2 , se calculait à partir de la formule :

$$X_c = 2e \cdot \sqrt{(V_2 + V_1) / \sqrt{(V_2 - V_1)}}$$

Il suffit donc de prendre $2 \cdot X_c$ pour ne pas courir le risque de mettre en place un dispositif trop court.

Exemple pour un substratum à 30 m :

TABLEAU III
CALCUL DE LA LONGUEUR DU DISPOSITIF

V_1	400	1500	2000	2500	3000
V_2	4500	4500	4500	4500	4500
X_c	66	85	96	111	135

Ce qui représente une longueur allant de 130 m pour un contexte de sédiment meuble sur substratum sain, à 270 m pour l'étude de la frange altérée d'un substratum, soit un coefficient allant de quatre à neuf fois la profondeur de l'objectif.

Sans renseignement particulier sur le site étudié, on prend généralement en terrestre un coefficient voisin de 6 pour la réalisation du premier dispositif, c'est-à-dire 120 m de longueur de dispositif pour une profondeur d'investigation de 20 m.

À titre d'information, pour un milieu à trois couches :

$$X_{C_2} = 2.e_2 \sqrt{\frac{V_3 + V_2}{V_3 - V_2}} - 2.e_1 \frac{V_3 \sqrt{V_2^2 - V_1^2} - V_2 \sqrt{V_3^2 - V_1^2}}{V_1 \cdot (V_3 - V_2)}$$

où la première couche est caractérisée par la vitesse V_1 et l'épaisseur e_1 , la deuxième couche par la vitesse V_2 et l'épaisseur e_2 , et la troisième couche d'épaisseur infinie par la vitesse V_3 .

De toute façon, il est vivement conseillé de réaliser une pré-interprétation minute sur le site dès la réalisation du premier tir, afin de vérifier que la valeur des vitesses de fond correspond bien à l'objectif recherché, car il arrive parfois que les vitesses intermédiaires soient si proches les unes des autres que les angles de réfraction limite atteignent des valeurs telles que l'on se retrouve avec des distances critiques particulièrement élevées. Ce phénomène se produit parfois en zone aquatique où il arrive qu'il soit nécessaire d'utiliser un dispositif de 100 m de long pour atteindre une profondeur d'investigation de 8 à 10 m.

Le nombre de capteurs par dispositif étant fixé, le paramètre sur lequel on agit pour satisfaire cette condition de longueur du dispositif est la distance entre les capteurs ou intertrace. Cet intertrace peut être variable sur un même dispositif ; en effet on resserre quelquefois les capteurs près des points de tir pour obtenir une meilleure précision sur les couches très superficielles.

La profondeur du substratum sismique atteint et bien reconnu par un dispositif déterminé est quelquefois appelée « profondeur d'investigation ».

2.1.2.3. Choix de la distance des tirs « offset »

Il est absolument nécessaire que les tirs « offset » (O et P) soient implantés à une distance telle que la propagation enregistrée sur la totalité des capteurs du dispositif corresponde à une réfraction totale sur le substratum sismique.

Dans l'hypothèse d'un objectif ayant peu ou pas de pendage et avec un contraste de vitesses suffisant, si la longueur du dispositif est bien ajustée on positionne ces points de tir lointains à une distance égale à la demi-longueur de ce dispositif.

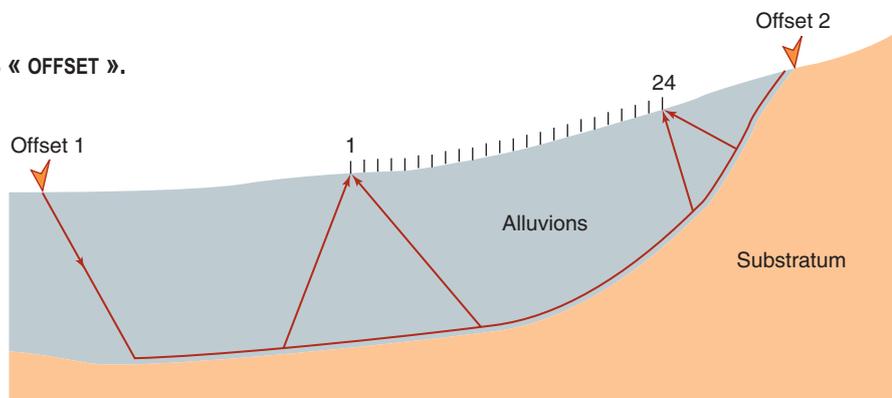
Le choix devient plus complexe quant on veut suivre un substratum présentant un pendage important. Il est alors indispensable d'ajuster les distances de tir comme illustré sur la figure 13, où l'on voit que le tir offset 1 a dû être placé à une grande distance du capteur 1, cela afin de laisser au front d'onde le temps d'atteindre le toit du substratum, alors qu'il suffisait de placer le tir offset 2 près de l'affleurement afin d'être sûr d'avoir une onde réfractée au toit de ce substratum.

Quelquefois, il est également très opportun, lorsque les dispositifs sont jointifs et forment un profil, de réaliser des tirs offset supplémentaires positionnés en plusieurs points de tirs des dispositifs adjacents. On obtient ainsi des branches de dromochroniques définies par des pointages sur 24, 36, 48 capteurs, voire plus.

Lorsqu'elle est économiquement viable, cette façon de procéder conduit, par les nombreux recoupements d'informations qu'elle permet, à des interprétations de grande qualité.

FIGURE 13

IMPLANTATION DES TIRS « OFFSET ».



Important

En l'absence de toute indication sur le pendage, il est recommandé, pour éviter les mauvaises surprises, de réaliser des « offset » distants des tirs en bout d'une longueur égale à la longueur du dispositif.

Remarque

Sur les sites à forte couverture meuble (latérite argileuse surmontant le socle cristallin dans les pays tropicaux et équatoriaux), il est pratiquement impossible d'obtenir de tirs « offset » exploitables lorsque le tir est exécuté sur une forte épaisseur de couverture et ce même avec de très fortes charges. Dans ce cas, le choix des positions optimales des « offset » n'obéit plus à un critère de distance, mais d'altitude du point de façon à le situer le plus près possible du socle. Il est ainsi recommandé de positionner les « offset » (lorsque cela est possible) au droit de lignes d'écoulement d'eau qui ont raviné partiellement ou totalement la couverture, même lorsque ces points se situent près de l'extrémité de la ligne des capteurs.

2.1.3. Relevé topographique

Un relevé de la position des dispositifs doit systématiquement être effectué afin, d'une part, de prendre en compte la topographie dans l'interprétation finale et, d'autre part, de pouvoir aisément situer les éventuelles anomalies.

Le nombre de points relevés va bien sûr dépendre de la complexité de la topographie du site et de la précision recherchée par le maître d'ouvrage.

Cela peut aller d'un simple relevé X, Y, Z de chaque extrémité du dispositif, à un relevé X, Y, Z de la position de l'ensemble des 24 capteurs.

2.1.4. Gestion du temps zéro

On appelle « Temps Zéro », ou « Time Break », ou « TB », l'instant effectif où le tir est déclenché. C'est à partir de cet instant que les temps d'arrivée aux capteurs doivent être observés ou calculés.

Un temps zéro parfaitement maîtrisé est indispensable à la réalisation d'une interprétation fiable et de bonne qualité.

L'idéal est de disposer de détonateurs « sismiques » spécialement conçus pour la géophysique et présentant l'avantage d'être des instantanés ayant subi un contrôle plus sévère afin de garantir un temps zéro parfait.

Ce type de détonateurs est parfois impossible à trouver dans certains pays et l'on se retrouve ainsi à gérer des détonateurs présentant des délais importants. La seule solution fiable est alors de travailler « à la rupture » en enroulant le câble relié à l'entrée TB de l'enregistreur autour de la charge.

On vérifiera bien sûr au préalable que l'enregistreur utilisé permet un déclenchement à l'ouverture ou à la fermeture d'un circuit.

Cette méthode s'accompagne malheureusement souvent d'entraînements électriques importants perturbant la qualité du film sismique enregistré.

On conseillera alors d'utiliser un boîtier électronique « tampon » permettant de relayer un signal d'ouverture plus propre vers l'enregistreur.

Dans l'hypothèse où l'opérateur a des doutes sur la qualité de son temps zéro, suite à l'utilisation de détonateurs avec délais ou de sources de type chute de poids, nous conseillons d'effectuer un calage en réalisant tout simplement un tir à la masse avec un système de déclenchement de type « hammerswitch » (contacteur à mercure).

On doit également tenir compte de la profondeur d'enfouissement de la charge qui peut nécessiter une correction du temps zéro de quelques millisecondes.

2.1.5. Conseils pratiques

Le lecteur trouvera dans ce paragraphe quelques conseils lui permettant d'anticiper autant que possible certains problèmes qu'il serait susceptible de rencontrer dans le cadre de la réalisation d'une prospection de sismique réfraction.

2.1.5.1. Élaboration de l'offre

Il n'est pas inutile de rappeler ici que la proposition financière va dépendre de nombreux facteurs dont les plus importants sont :

Cadre administratif

➤ On doit respecter certaines contraintes administratives relatives à l'hygiène et la sécurité, à l'assurance qualité, ainsi que celles nécessaires aux bonnes relations avec les services territoriaux (mairies, département, équipements civils, etc.) et les propriétaires privés. Très souvent, l'existence d'un arrêté préfectoral ne constitue pas une fin, mais un moyen permettant un contact plus aisé avec les divers intéressés.

Cadre géographique

- Topographie des profils étudiés.
- Environnement immédiat : présence de routes, voies ferrées, zone urbanisée créant non seulement des problèmes de sécurité dans le cadre de l'utilisation d'explosif, mais aussi un bruit ambiant dont il est parfois difficile de s'affranchir.
- Nécessité de débroussailler les profils.
- Accès au site.

Cadre contractuel

- Délais, pénalités de retard.
- Nombre de réunions intermédiaires avec la maîtrise d'œuvre.
- Nombre d'exemplaires du rapport, cela peut parfois aller jusqu'à 10.
- Prise en charge des dégâts inhérents à la réalisation des reconnaissances sismiques tels que l'ouverture des layons dans les cultures, les traces de surcreusement laissées par la réalisation des tirs, etc.

2.1.5.2. Mesures*Présence de lignes EDF et/ou d'équipements enterrés*

Il est important de vérifier que des lignes EDF moyenne ou haute tension ne traversent pas le site au droit des profils à effectuer, ce qui interdirait toute utilisation de l'explosif compte tenu des risques de déclenchements intempestifs des détonateurs soumis au champ électromagnétique créé par les lignes.

La seule solution est alors d'utiliser soit des sources de type chute de poids dont les coûts d'amenée et repli et de mise en œuvre sont nettement plus élevés, soit des sources de type fusil (shotgun) moins coûteuses mais limitées à la réalisation de dispositifs courts compte tenu de leur faible énergie.

Déclenchements intempestifs de l'enregistreur

La cause principale pouvant engendrer des déclenchements aléatoires de l'enregistreur est généralement liée à l'apparition d'un temps orageux créant de fortes perturbations électromagnétiques.

Il est alors extrêmement difficile voire impossible de travailler sachant que de toute façon un boutefeu prudent arrêtera les tirs compte tenu des risques encourus.

Une autre cause de déclenchement incontrôlé de l'enregistreur peut être liée à la présence d'un relais hertzien (radio ou téléphone) situé près du site. Une solution peut être alors de couper l'effet d'antenne en effectuant un certain nombre de boucles avec le câble TB. Le succès de cette opération n'est bien sûr pas garanti sachant que cela dépendra de la puissance et de la fréquence sur laquelle travaille l'émetteur.

Présence d'entraînements

La qualité des enregistrements est parfois perturbée par des entraînements électriques, qui la plupart du temps rendent les films illisibles.

Véritable plaie du sismicien, ces entraînements ont le plus souvent des causes mal identifiées : entraînement par le signal du « time break », d'une trace ou du tir lui-même (le plus fréquent).

Les « remèdes » utilisés sont plus ou moins efficaces :

- mise de l'enregistreur à la masse,
- éviter de croiser la ligne de tir et les flûtes sismiques,
- diminution des gains des traces délivrant un signal trop important.

Tirs à l'explosif

Compte tenu des nombreux problèmes administratifs et juridiques que pose l'utilisation de l'explosif, nous conseillons vivement, même si l'on est titulaire d'un brevet de boutefeu, de sous-traiter la réalisation des tirs à une société spécialisée.

Celle-ci prendra en charge et sera responsable de :

- l'envoi des courriers à toutes les administrations concernées avant le démarrage du chantier,
- la fourniture et le stockage de l'explosif,
- la mise en place et la réalisation des tirs,
- la destruction ou le retour au dépôt de ce qui restera d'explosifs et de détonateurs en fin de chantier.

2.2. ACQUISITION DES DONNÉES

2.2.1. Signal sismique

Un signal sismique est une représentation, en fonction du temps, du mouvement du sol produit par un ébranlement (provoqué ou non).

Le signal présenté ci-dessous se divise en deux zones bien distinctes :

- la première, relativement calme, précède l'arrivée de l'onde sismique au capteur, les faibles signaux enregistrés correspondent aux différents bruits de fond caractérisant le site. Ces bruits de fond peuvent être liés soit à l'activité humaine : site industriel, circulation routière, etc., soit à des phénomènes naturels : vent, pluie, etc.,
- la seconde commence à l'arrivée du front d'onde qui marque le passage de l'état de repos relatif du sol à l'état d'agitation consécutif à l'arrivée de l'ébranlement. On notera que derrière ce front d'onde qui marque l'arrivée de l'onde de compression au capteur se superposent des vibrations très variées, résultant de trajets plus ou moins complexes au sein des couches du sous-sol (Fig. 14).

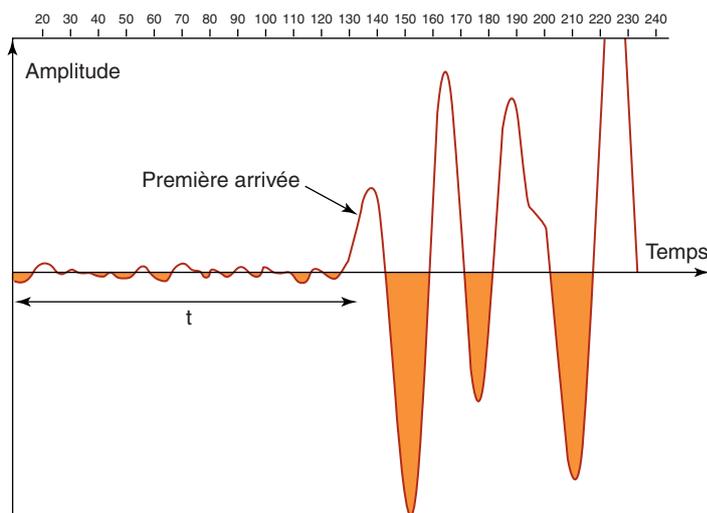
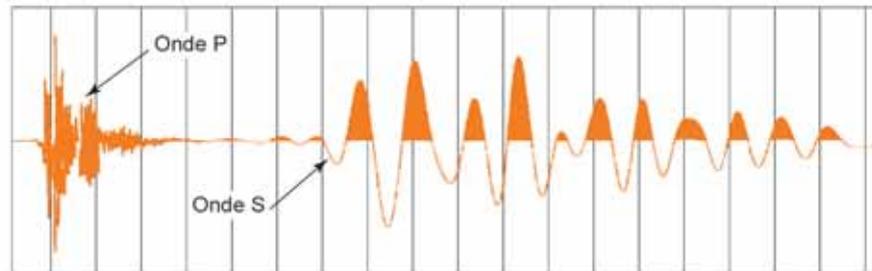


FIGURE 14
EXEMPLE DE SIGNAL SISMIQUE.

- sur le signal suivant, on a représenté les deux ondes P et S (Fig. 15). Ce type de signal peut être produit par certains matériels et dispositifs très spécifiques dans le but de déterminer les vitesses des ondes P et des ondes S. Mais dans le cas général, le signal S est noyé dans l'ébranlement qui suit l'arrivée du front d'onde P et seuls les trajets des ondes P peuvent être chronométrés.

FIGURE 15

ENREGISTREMENT ONDES P ET S (DOCUMENT GEODIA).



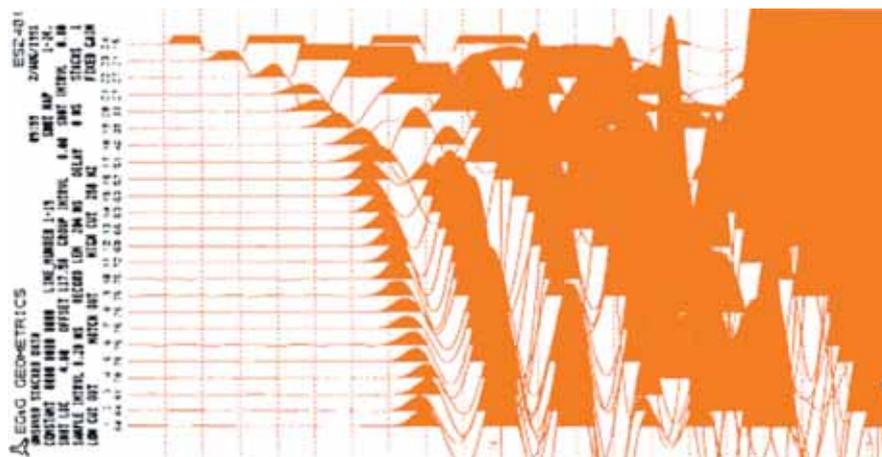
2.2.2. Enregistrement (film sismique)

Un signal sismique est enregistré en un point du sol par un capteur (sismographe ou géophone). Si on dispose un certain nombre de géophones (en général en ligne droite) et que l'on enregistre sur un même document les signaux sismiques obtenus par un même impact, on obtient un film sismique, à partir duquel il est aisé de déterminer les temps de trajet entre le point origine de l'ébranlement et les divers capteurs.

La figure 16 présentée ci-dessous correspond à un enregistrement, ou film sismique, effectué avec un dispositif comprenant 24 capteurs.

FIGURE 16

ENREGISTREMENT SISMIQUE MULTI-TRACES (DOCUMENT GEODIA).



Qualité de l'enregistrement

Il est important de juger sur site de la qualité de l'enregistrement réalisé afin de prendre la décision de refaire ou non un tir, voire de le sommer (option « stack »).

En effet, l'identification de la première arrivée n'est pas toujours évidente, il se peut que certains tirs soient trop bruités et/ou que l'énergie reçue soit insuffisante. On risque

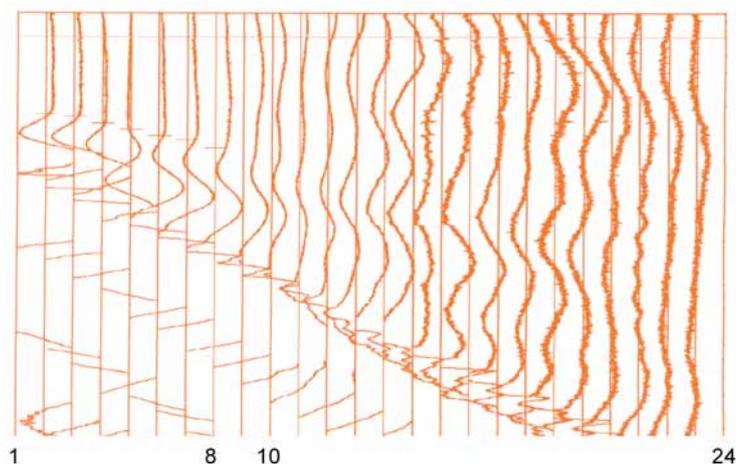
alors de rater la première arrivée, le pointé se faisant sur des réfractées secondaires tardives, voire même dans certains cas sur l'arrivée de l'onde S.

Il arrive malheureusement que des départs jugés corrects soient en réalité liés à une phase postérieure à la première arrivée. Ce risque de perte de phase (une ou plusieurs) peut donc amener à sous-estimer les valeurs des vitesses sismiques.

La figure 17 présente un exemple de traces fortement bruitées sur lesquelles les départs sont difficiles à identifier. Le film est alors qualifié de « mou » et il est inexploitable à partir des traces 8 à 10.

FIGURE 17

ENREGISTREMENT BRUITÉ.



Il est important de rappeler à cette occasion qu'un contrôle qualité d'une reconnaissance par sismique réfraction passera, en particulier, par l'analyse de la qualité des enregistrements réalisés et des pointés effectués.

Il est donc primordial pour un client de demander à son prestataire de service la fourniture des dromochroniques et des enregistrements bruts en annexe du rapport final.

On peut, comme pis-aller, pointer des arrivées tardives et corriger les temps du retard de phase correspondant. Cette opération, source d'erreurs, mais parfois nécessaire, doit être contrôlée par le superviseur de l'étude ou par un ingénieur très expérimenté.

2.2.3. Transformation du film sismique en document interprétable

La première étape du traitement des données enregistrées consiste à pointer pour chaque trace sismique le temps de première arrivée de l'onde au capteur.

Le report des 24 temps se fait sur un graphique « temps-distance » appelé branche de dromochronique.

La dromochronique présentée ci-dessous correspond aux résultats obtenus dans le cadre d'un milieu simple à deux couches de vitesses V_1 et V_2 (Fig. 18).

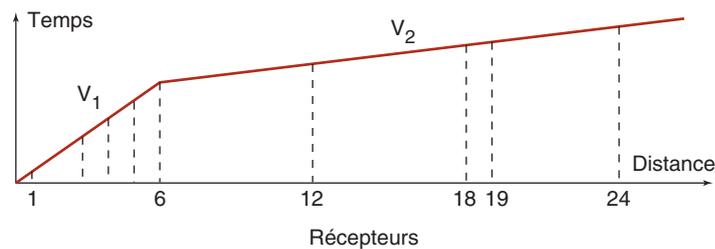
Ce graphique est le graphique unitaire et théorique de base à partir duquel on peut calculer les profondeurs de diverses couches et leurs vitesses. On verra dans le paragraphe suivant qu'une interprétation correcte nécessite, pour un dispositif

déterminé, de disposer de plusieurs graphiques de ce type correspondant à autant d'impacts enregistrés sur ce linéaire.

L'interprétation sismique réfraction se fera donc sur la base des dromochroniques, courbes qui correspondent simplement au pointé des premières arrivées de l'onde réfractée sur les géophones.

FIGURE 18

GRAPHIQUE « TEMPS - DISTANCE » : DROMOCHRONIQUE.



2.3. MATÉRIEL

2.3.1. Capteurs

Compte tenu des objectifs recherchés et de la longueur des dispositifs utilisés : 60 à 240 m, les géophones les plus adaptés à la sismique réfraction appliquée au génie civil et à l'hydrogéologie sont ceux présentant une fréquence propre comprise entre 8 et 14 Hz, les 10 Hz étant les plus communément utilisés (Fig. 19).



FIGURE 19

CAPTEUR.

La courbe de réponse présentée ci-dessous correspond à celle d'un géophone Mark Products L-28 10 Hz.

On notera que cette courbe est limitée à une fréquence maximale de 200 Hz, ce qui correspond à la fréquence maximale à partir de laquelle le constructeur ne garantit plus la qualité de la réponse du capteur (risque de distorsion et d'atténuation du signal sismique) (Fig. 20).

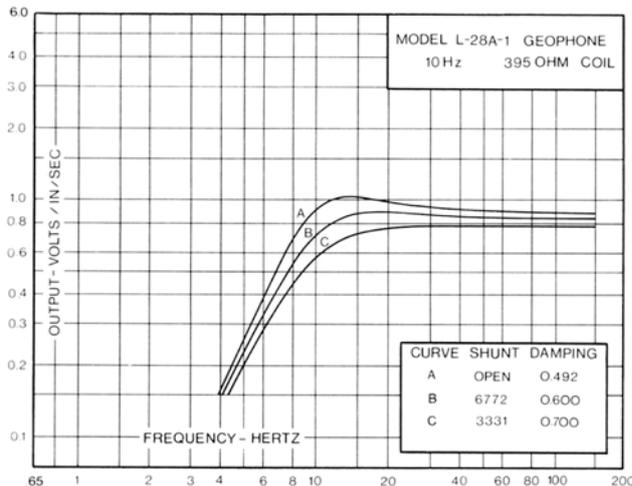


FIGURE 20
COURBE DE RÉPONSE.

Rappelons que la réponse des capteurs sismiques classiques est une réponse en volts induits dans la bobine, proportionnelle à la vitesse de déplacement de cette bobine (donc du sol), appelée vitesse particulière. Il importe que cette réponse, donc le rapport tension induite sur vitesse particulière soit indépendant des autres paramètres du signal et du capteur, en particulier de la fréquence. C'est ce que traduit le graphique « constructeur », ici entre 20 et 200 Hertz, fourchette dans laquelle se situent généralement les fréquences des signaux sismique réfraction.

On rappellera que dans le cadre des études dont l'objectif est d'individualiser les ondes P et S, il existe des capteurs tridirectionnels composés d'un capteur vertical et de deux capteurs horizontaux.

2.3.2. Enregistreurs

Les constructeurs diffusent une gamme complète d'enregistreurs allant de 12 à 96 traces.

Nous conseillons d'investir dans un matériel présentant au minimum les caractéristiques suivantes :

- pas d'échantillonnage minimal de 1/10 de ms,
- amplificateur à virgule flottante et convertisseur analogique/numérique d'au moins 20 bits,
- déclenchement à partir d'un géophone, d'un signal TTL, ainsi qu'à la fermeture et à l'ouverture d'un contact,
- filtres 50 Hz et 60 Hz à l'acquisition,
- possibilité de filtrage Passe Haut, Passe Bas et Passe Bande à l'acquisition et à la visualisation,

- possibilité d'additionner les tirs (option « stack »),
- sauvegarde des données sur disquette 3^{1/2} ou disque dur en format SEG2 + support externe via USB ou réseau.

La présence d'une imprimante intégrée à l'enregistreur est préférable pour certaines applications, où il peut être indispensable par exemple de comparer en les superposant, deux films offsets afin d'optimiser la distance de tir (Fig. 21).

FIGURE 21
ENREGISTREUR SISMIQUE.



2.3.3. Sources

Le choix de la source est un des éléments importants dont dépend la qualité de l'étude réalisée. Celle-ci doit être adaptée à la nature des terrains auscultés et à la longueur du dispositif effectué.

La source la plus énergétique est l'explosif.

2.3.3.1. Explosif

Plusieurs types de dynamite-gommes sont disponibles.

Nous conseillons l'utilisation d'un explosif qui possède une vitesse de détonation > 5 000 m/s (type BAM ou NC4).

Les détonateurs utilisés doivent être instantanés ou à retard 0, l'idéal étant de commander des détonateurs dits « sismiques » spécialement conçus pour la géophysique et présentant l'avantage d'être des instantanés ayant subi un contrôle plus sévère afin de garantir un temps zéro parfait.

La réalisation de tirs à l'explosif implique l'utilisation d'une boîte de tir spéciale permettant de déclencher l'enregistreur en même temps que le tir (type EGG GEOMETRICS HVB1 par exemple).

On rappellera à cette occasion qu'il faut faire très attention aux puissantes boîtes de tir utilisées par les carriers qui peuvent provoquer d'importants entraînements sur les enregistrements (induction).

2.3.3.2. Sources non destructives type chute de poids

Un grand nombre de sources est disponible.

Le plus difficile est d'anticiper, lors de la préparation de l'étude, le type de source nécessaire à la réalisation d'une investigation à une profondeur donnée.

Le tableau IV donne une indication des puissances nécessaires en fonction des profondeurs d'investigation souhaitées.

TABLEAU IV

PUISSANCE DES SOURCES SISMIQUES TYPE CHUTE DE POIDS

Profondeurs (m)	Longueurs du dispositif (m)	Puissances (Joules)	Exemples
15	60	100	Masse de 5 kg
30	120	1000	Dameuse DELMAG
50-60	240	2500	Source VAKIMPAC
> 100	480	5000	Source SOURSILE

Ces valeurs ne sont qu'indicatives, la nature des terrains superficiels jouant un rôle primordial (Fig. 22a, b, c).

L'obtention d'un temps zéro fiable est assez délicate.

L'utilisation d'un géophone placé à 0,5 ou 1 m de la plaque de frappe est fortement déconseillée, l'erreur sur le temps zéro pouvant être de plusieurs millisecondes.

Le plus simple est de placer un géophone à bain d'huile directement sous la plaque de frappe.

Il est de toute façon fortement conseillé d'effectuer un calage de ce temps zéro à l'aide d'une masse équipée d'un déclenchement type « hammerswitch » (contacteur à mercure).

2.3.3.3. Sources non destructives de type « fusil »

Il existe des sources fonctionnant sur le principe du fusil (shotgun, betsygun, etc.).

Il s'agit généralement de faire rentrer le « canon » du fusil dans le sol à partir d'un trou effectué à la tarière ou à la barre à mine, puis de générer une onde de choc en utilisant une ou plusieurs cartouches à blanc.

Ces sources sont assez délicates à mettre en œuvre et ne fonctionnent bien que dans des terrains de recouvrement ayant une bonne cohésion (terrains argileux de préférence).

FIGURE 22

SOURCES NON DESTRUCTIVES DU TYPE CHUTE DE POIDS (DOCUMENTS GEODIA).



a. Dameuse Delmag.



b. Vakimpac.



c. Soursile.

2.3.4. Flûtes sismiques

Les capteurs transmettent au laboratoire le signal reçu par un ensemble de conducteurs isolés et rassemblés dans une gaine appelée « flûte sismique ».

On utilise en général plusieurs flûtes 12 traces.

L'isolation minimale entre canaux doit être de 66 db afin d'éviter tout risque d'entraînement parasite.

À l'utilisation de connexions type pince Muller, présentant des risques de fuites et d'entraînements électriques par temps humide, on préférera la mise en œuvre d'une flûte équipée de connexions étanches.

2.3.5. Système de déclenchement par radio

La position de certains tirs offset peut rendre difficile voire impossible l'installation de la ligne TB permettant de déclencher l'enregistreur ; il est alors extrêmement utile de disposer d'un système de déclenchement par radio permettant de relayer le signal du tir vers l'enregistreur.

Chapitre 3

Interprétation des résultats



A. INTERPRÉTATION GÉOPHYSIQUE

3.1. Préliminaires - Vérification de la qualité des pointés effectués	37	
3.2. Exemples de dromochroniques associées à différents modèles géologiques	39	
3.3. Interprétation classique	40	Partie 1
3.3.1. Détermination des vitesses sur la dromochronique	41	
3.3.2. Détermination des valeurs d'intercept ou délais au droit des deux tirs	42	
3.4. Interprétation par la méthode du « Plus-Minus »	44	
3.4.1. Construction du « Plus »	44	
3.4.2. Construction de la courbe Minus	46	Partie 2
3.4.3. Enseignements tirés de la courbe Minus	49	
3.4.3.1. Mise en œuvre	49	
3.4.3.2. Interprétation sismique	50	

B. INTERPRÉTATION EN TERME DE GÉOLOGIE

3.5. Signification des vitesses sismiques, utilisation par l'ingénieur	50	
3.6. Marche à suivre	52	
3.7. Recommandations	53	

Chapitre 3.

Interprétation des résultats



A. INTERPRÉTATION GÉOPHYSIQUE

Dans ce chapitre, on s'est limité à l'exposé des méthodes d'interprétation les plus classiques et les plus simples qui constituent le bagage minimal de tout interpréteur. L'annexe 4 est un prolongement théorique de l'interprétation classique qui pourra être utile lorsque des interprétations très sophistiquées s'avèrent nécessaires. Les notions exposées dans cette annexe se révèlent particulièrement utiles lorsque, dans une seconde phase de l'étude, il convient de faire correspondre les résultats géophysiques avec les reconnaissances mécaniques, et de comprendre les éventuelles discordances qui peuvent être constatées.

En sismique réfraction, comme dans la quasi-totalité des méthodes géophysiques, l'interprétation des mesures est d'autant plus aisée qu'on se rapproche le plus possible des modèles théoriques habituellement utilisés.

□ **La première partie** de ce chapitre (paragraphe 3.1. *Préliminaires - Vérification de la qualité des pointés effectués* à paragraphe 3.3. *Interprétation classique*) traite de l'interprétation classique applicable aux modèles géologiques simples remplissant les conditions suivantes :

1. Les vitesses des diverses couches doivent suivre une loi croissante en fonction de la profondeur. En d'autre terme, si une couche a une vitesse V_p inférieure à la vitesse V_{p-1} de la couche qui la surmonte, la couche d'ordre p ne peut pas être mise en évidence.
2. Pour qu'une couche soit mise en évidence, son épaisseur ne doit pas être trop faible par rapport à sa profondeur.
3. On doit être en présence de couches tabulaires se rapprochant le plus possible de plans ou de surfaces à grand rayon de courbure.
4. Ces couches doivent être homogènes et isotropes, c'est-à-dire que la vitesse sismique doit être la même en tout point d'une couche déterminée et suivant toutes les directions.
5. Ces couches peuvent avoir des pendages différents sans que ces pendages ne deviennent excessifs.

□ La **seconde partie** de ce chapitre (paragraphe 3.4. *Interprétation par la méthode du « Plus-Minus »*) présente l'interprétation effectuée sur les bases de la théorie du « Plus-Minus » applicable aux modèles géologiques non tabulaires présentant des changements de faciès s'accompagnant d'une évolution des vitesses de fond.

PARTIE 1

3.1. PRÉLIMINAIRES - VÉRIFICATION DE LA QUALITÉ DES POINTÉS EFFECTUÉS

Une fois que le report des dromochroniques correspondant au dispositif a été effectué, un contrôle de la qualité des pointés doit être réalisé en vérifiant que les points suivants sont bien respectés :

a - Respect du principe de l'égalité des temps réciproques

En vertu du principe du retour inverse, le temps de trajet de A vers B doit être rigoureusement égal au temps de trajet de B vers A, à la précision des mesures de temps près.

À titre d'exemple, le temps d'arrivée du tir en bout 1 sur le capteur 24 doit être égal au temps d'arrivée du tir en bout 24 sur le capteur 1.

Cette règle s'applique aussi aux tirs intermédiaires : centre, $\frac{1}{4}$ et $\frac{3}{4}$.

La figure 23 illustre cette règle pour le tir au centre et les deux tirs en bout.

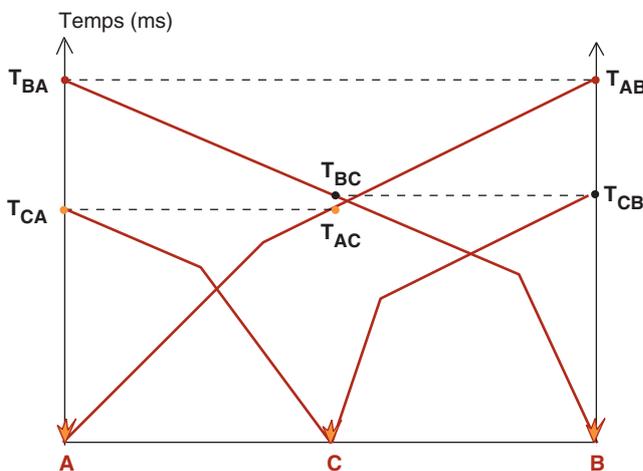


FIGURE 23

PRINCIPE DE L'ÉGALITÉ DES TEMPS RÉCIPROQUES.

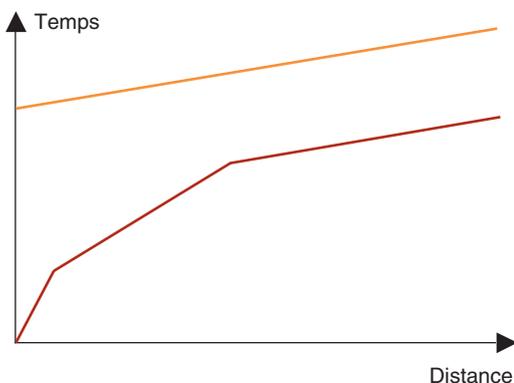
Dans la pratique, on s'aperçoit que lors d'expérimentations soigneusement menées, cette propriété se vérifie avec une très grande régularité et une grande précision.

Le non respect de cette propriété est lié :

- soit à un mauvais pointé lié à des pertes de phase (film trop « mou »),
- soit à un problème de temps zéro mal contrôlé,
- soit à un enfouissement important de la charge dans le terrain superficiel,
- soit à une topographie particulière du point de tir qui conduit à des délais très différents entre ce dernier et le capteur proche.

b - La pente de l'extrémité du tir en bout doit être parallèle à celle du tir « offset » dans la mesure bien sûr où les deux tirs ont atteint le même substratum (Fig. 24)

FIGURE 24
COHÉRENCE DES POINTÉS (a).

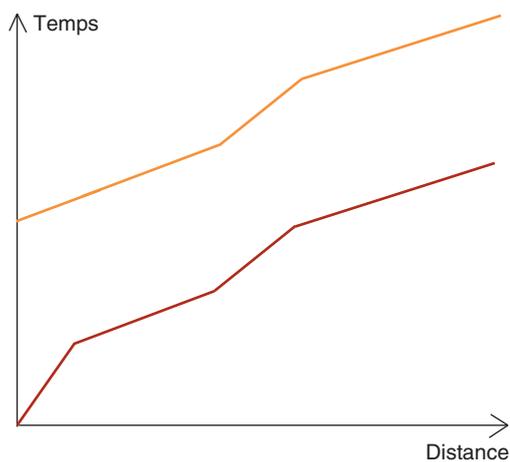


c - Les mêmes mouvements doivent être retrouvés sur les différents tirs (Fig. 25)

Cette propriété doit être scrupuleusement vérifiée lorsqu'on a la certitude que les tronçons intéressés correspondent à une propagation sur le même réfracteur.

Dans le cas contraire, on doit vérifier la fiabilité des données expérimentales. Si celles-ci sont satisfaisantes, on est en présence d'une structure très particulière qu'il est nécessaire d'étudier et de contrôler à l'aide des autres tirs.

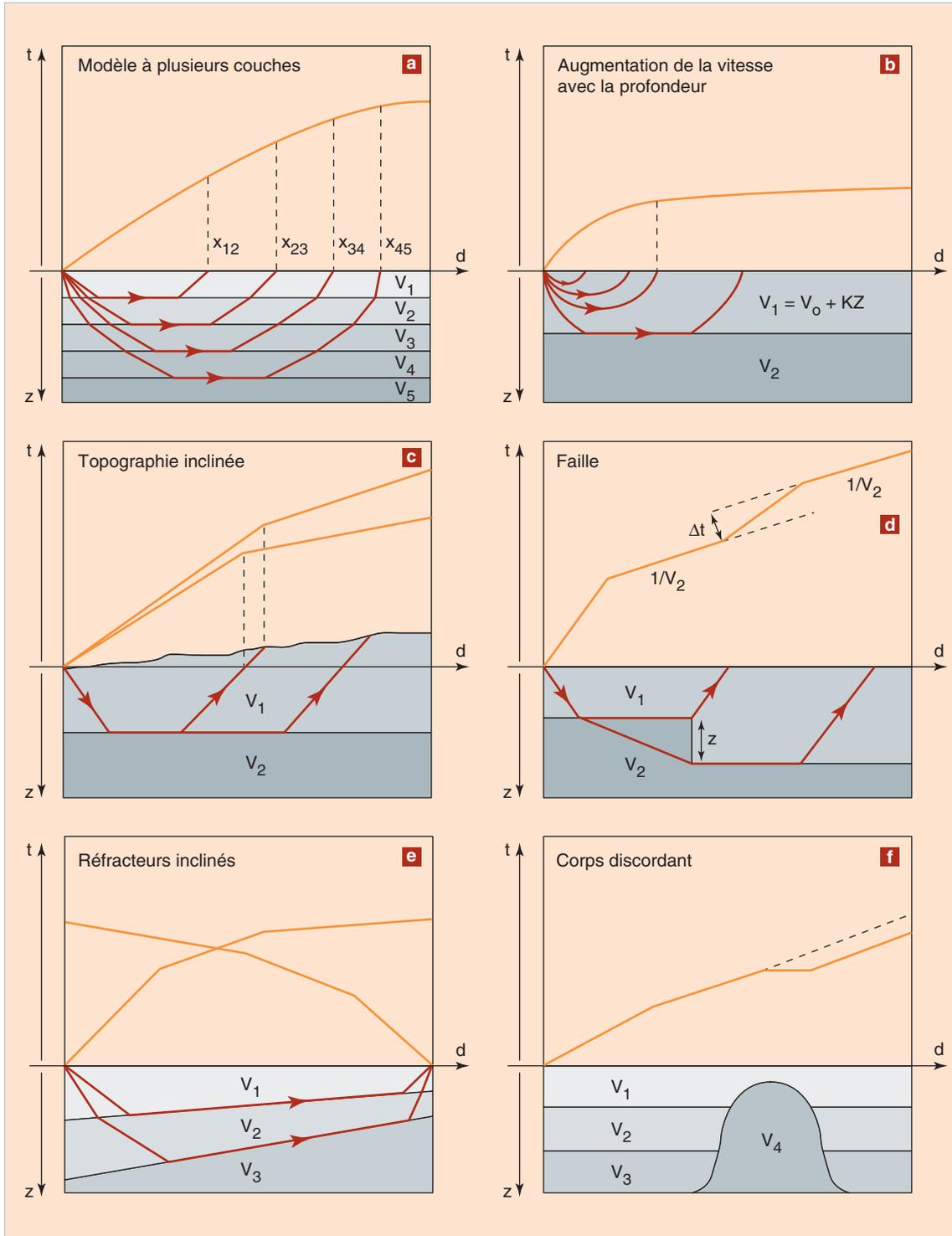
FIGURE 25
COHÉRENCE DES POINTÉS (b).



3.2. EXEMPLES DE DROMOCHRONIQUES ASSOCIÉES À DIFFÉRENTS MODÈLES GÉOLOGIQUES (Fig. 26)

FIGURE 26

DROMOCHRONIQUES ASSOCIÉES À DIFFÉRENTS MODÈLES GÉOLOGIQUES (TIRÉE DE L'OUVRAGE « GÉOPHYSIQUE DE GISEMENT ET DE GÉNIE CIVIL », DE J.-L. MARI, G. ARENS, D. CHAPPELLIER ET P. GAUDIANI, ÉDITION TECHNIP)

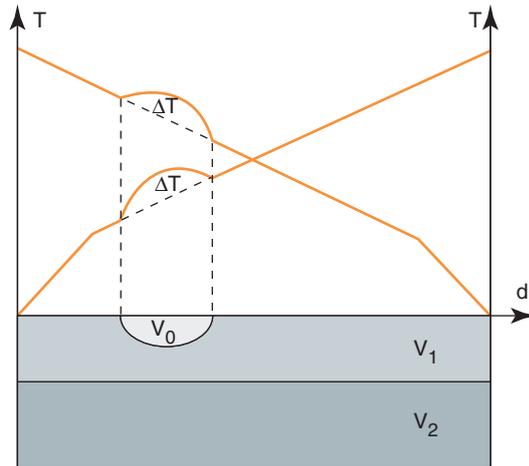


Présence d'une poche de terrain lent en surface

La dromochronique est alors « parasitée » au droit de l'anomalie par la présence d'un surdélai.

Cette anomalie de sub-surface étant placée directement sous les géophones, elle ne sera pas affectée par un déport lié à l'angle de remontée du front d'onde, on la retrouvera par conséquent reproduite à l'identique sur tous les tirs du dispositif (Fig. 27).

FIGURE 27
ANOMALIE LIÉE À UNE POCHE DE TERRAIN LENT.



3.3. INTERPRÉTATION CLASSIQUE

On abordera dans ce paragraphe les principes de l'interprétation utilisables dans les cas simples d'un schéma géologique en couches tabulaires.

Cette schématisation conduit à une interprétation nécessairement sommaire des données de sismique réfraction. Cette vision simplifiée reste cependant fondamentale et irremplaçable. Bien que s'appuyant sur des notions très simples de géométrie plane, elle constitue la base incontournable de tous les développements ultérieurs y compris ceux aboutissant à des interprétations plus sophistiquées et qui seront traitées dans le paragraphe suivant et en annexe.

Les interprétations ci-après ont pour base les notions et formules exposées au paragraphe 1.2. *Propagation dans les milieux discontinus.*

L'interprétation simple repose sur seulement deux formules :

➤ La première permettant de calculer l'épaisseur des horizons sismiques à partir des valeurs de délai (Intercept/2) :

$$D_{n-1} = \sum_{p=1}^{n-1} \frac{e_p \cos i_{p,n}}{V_p}$$

avec $V_p/V_n = \sin i_{p,n}$

➤ La deuxième permettant de calculer les vitesses vraies à partir des valeurs de vitesses apparentes directes (V_{amont}) et inverses (V_{aval}), au cosinus près de l'angle de pendage :

$$V_p = \frac{2V_{am} \cdot V_{av}}{V_{am} + V_{av}}$$

L'exemple présenté ci-dessous résume les règles de base de l'interprétation classique dite simplifiée (Fig. 28).

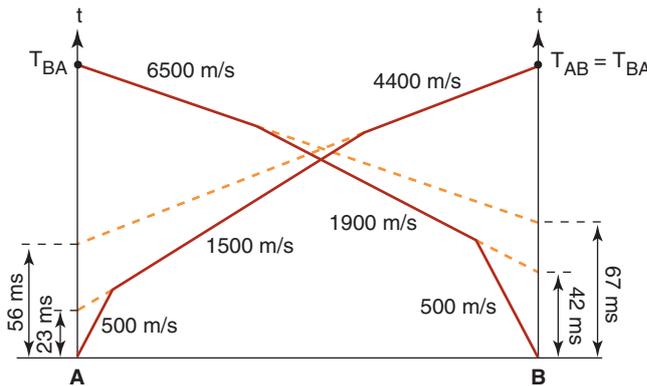


FIGURE 28
INTERPRÉTATION CLASSIQUE SIMPLIFIÉE.

3.3.1. Détermination des vitesses sur la dromochronique

La dromochronique de la figure 28 est « stylisée ». Les points représentatifs du temps d'arrivée à chaque capteur ne s'alignent jamais de façon parfaite comme sur cette dromochronique.

a - Lorsque la topographie est relativement plane et que les terrains superficiels sont homogènes et ne présentent pas de variations brutales d'épaisseur, les points se distribuent de façon sub-linéaire. Les droites indiquées sur la figure 28 apparaissent assez bien comme des droites moyennes.

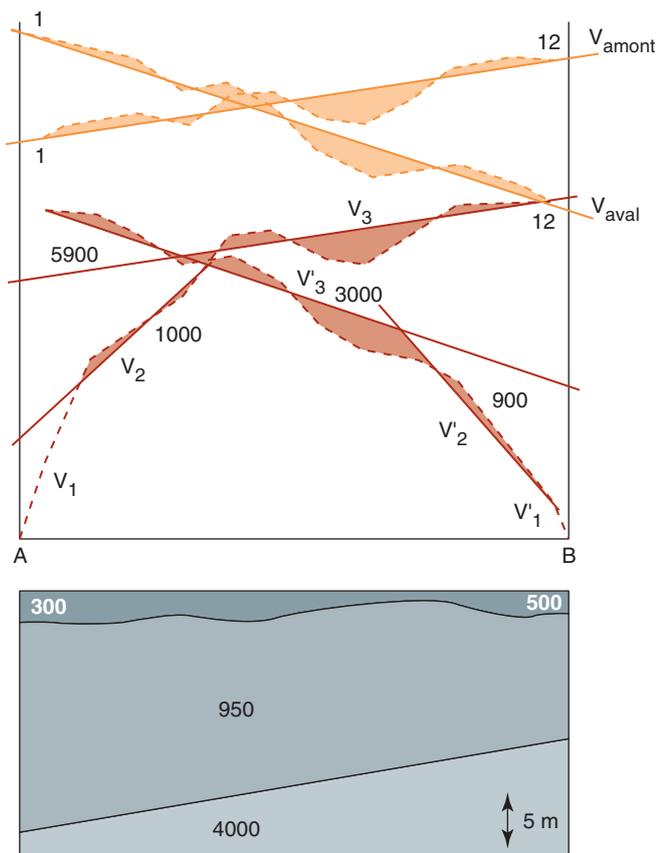
En présence de telles dromochroniques peu parasitées par les effets d'hétérogénéités des terrains superficiels et semi-superficiels, on parvient assez aisément à déterminer les vitesses :

- d'une part, en isolant au mieux les segments de droite qui sont la marque réfractée des diverses couches,
- d'autre part, en couplant correctement les vitesses issues de deux tirs opposés pour définir une vitesse vraie expurgée de l'effet du pendage.

b - À l'inverse lorsque le site est « chahuté » topographiquement et structurellement, les points se distribuent sur des courbes dont il est *a priori* difficile de dégager des tronçons de droite :

En présence de dromochroniques affectées de nombreuses irrégularités de forte amplitude, on doit en premier lieu analyser soigneusement les formes des tirs « offset ». Sur l'exemple de la figure 29, à partir des deux droites joignant les points représentatifs des capteurs extrêmes 1 et 12 des deux tirs offset, on constate que les mêmes anomalies se retrouvent point par point et avec des amplitudes égales sur ces deux tirs. Ce sont donc des anomalies de surface qui se retrouvent également sur les tirs en bout.

FIGURE 29
INTERPRÉTATION CLASSIQUE SUR
DROMOCHRONIQUES IRRÉGULIÈRES.



La vérification de la concordance des anomalies permet d'affirmer que les deux droites considérées sont représentatives des vitesses amont et aval du substratum et on peut en déduire la vitesse vraie par la formule de la moyenne harmonique.

- Si la topographie est plane, on doit affecter les anomalies à l'épaisseur de la couche de surface.
- Dans la majorité des cas, on constate que ces anomalies sont en fait des anomalies de la topographie de surface à la faveur de laquelle la couche à 950 m/s de notre exemple se trouve pas ou très peu affectée par ces anomalies.
- Dans tous les cas où les anomalies se retrouvent point par point sur deux tirs opposés, le toit du substratum ne présente aucune irrégularité de forme (cf. Fig. 27).

Cette dernière remarque montre qu'une soustraction des temps enregistrés sur deux tirs opposés donne un résultat indépendant des anomalies superficielles et éventuellement semi-profondes. Cette opération faite de proche en proche sur les capteurs est en fait la construction de la courbe « Minus » exposée plus loin (cf. paragraphe 3.4.2. *Construction de la courbe Minus*).

3.3.2. Détermination des valeurs d'intercept ou délais au droit des deux tirs

Les vitesses étant toutes bien déterminées, on obtient le délai sismique de chaque réfracteur par la détermination de l'intercept où ordonnée à l'origine de chaque droite.

Il apparaît donc que l'interprétation et le calcul des profondeurs suit le même processus que dans le cas de couches parallèles.

Les vitesses vraies (au $\cos\alpha$ près) étant calculées facilement par la moyenne harmonique des vitesses apparentes lues directement sur le graphique, il suffit de prendre en compte le délai de chaque couche, et de calculer de proche en proche les diverses profondeurs, étant entendu que ce calcul doit être fait pour chacun des deux points de tir A et B.

La dromochronique présentée en exemple (cf. Fig. 28) permet d'identifier trois vitesses :

- $V_1 = 500$ m/s,
- $V_2 = 1500$ m/s et 1900 m/s respectivement pour les impacts A et B,
- $V_3 = 4400$ m/s et 6500 m/s respectivement pour les impacts A et B.

Les délais (1/2 intercept) sont :

- en A : $D_1 = 11,5$ ms et $D_2 = 28$ ms,
- en B : $D_1 = 21$ ms et $D_2 = 33,5$ ms.

Les vitesses vraies sont au $\cos\alpha$ près égales à :

- $V_2 = 1680$ m/s,
- $V_3 = 5250$ m/s.

On rappellera que ces vitesses sont obtenues à partir de la formule approchée :

$$\frac{2}{V_2} = \frac{1}{V_{2am}} + \frac{1}{V_{2av}}$$

présentée dans le paragraphe 1.2.3. *Cas d'un seul marqueur plan incliné.*

La simple observation visuelle des pentes permet de voir le sens du pendage.

Notons que les valeurs de $\cos\alpha$ sont égales à 1 au 1/1000 près.

Par commodité, il est recommandé pour les calculs de choisir pour unités les millisecondes et les mètres, ce qui implique de choisir les kilomètres par seconde pour unité de vitesse.

Calcul des épaisseurs en A

$$D_1 = \frac{e_1}{V_1} \cos i_{1,2} = 11,5$$

$$\cos i_{1,2} = \cos[\text{Arcsin}(V_1/V_2)] = 0,955$$

$$e_1 = \frac{D_1 \cdot V_1}{\cos i_{1,2}} = \frac{11,5 \times 0,5}{0,955} = 6 \text{ mètres}$$

$$D_2 = \frac{e_1}{V_1} \cos i_{1,3} + \frac{e_2}{V_2} \cos i_{2,3}$$

$$\frac{e_2}{V_2} \cos i_{2,3} = D_2 - \frac{e_1}{V_1} \cos i_{1,3}$$

$$\cos i_{1,3} = \cos[\text{Arcsin}(V_1/V_3)] = 0,995$$

$$\cos i_{2,3} = \cos[\text{Arcsin}(V_2/V_3)] = 0,947$$

$$e_2 = (D_2 - \frac{e_1}{V_1} \cos i_{1,3}) \frac{V_2}{\cos i_{2,3}} = (28 - \frac{6}{0,5} \cdot 0,995) \frac{1,680}{0,947} = 28,5 \text{ mètres}$$

Le substratum à $5\,250$ m/s se trouve donc à $34,5$ m de profondeur au droit du tir A.

De même, on calcule les épaisseurs en B, à partir des délais en B (21 et 33,5 ms) :

- $e_1 = 11$ m,
- $e_2 = 20,6$ m.

Le substratum à 5 250 m/s se trouve donc à 31,6 m de profondeur au droit du tir B.

PARTIE 2

3.4. INTERPRÉTATION PAR LA MÉTHODE DU « PLUS-MINUS »

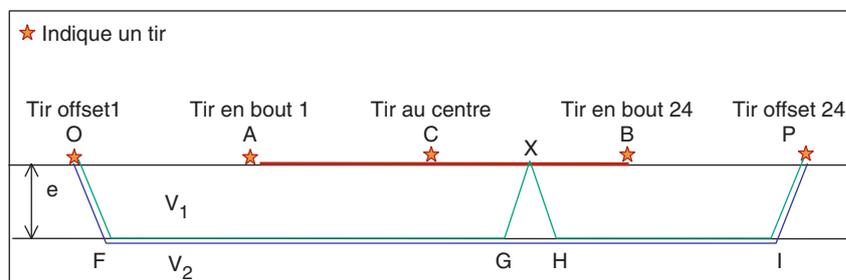
3.4.1. Construction du « Plus »

Important : La construction du « Plus » ne doit se faire qu'à partir de valeurs de temps de trajet direct et inverse correspondant au déplacement de l'onde sismique au toit du même marqueur qui est en général le substratum de l'étude.

Le « Plus » est ainsi généralement effectué sur les deux dromochroniques des tirs « offset » pour lesquelles les temps d'arrivée correspondent bien à un déplacement de l'onde effectué au toit du substratum sain (Fig. 30).

FIGURE 30

CONSTRUCTION DU « PLUS ».



La fonction « Plus » permet de calculer la valeur du délai sismique au droit de chaque capteur.

La valeur du Plus au droit du capteur X est égale à :

$$T_{\text{plus}} = T_{\text{OX}} + T_{\text{PX}} - T_{\text{OP}}$$

Avec

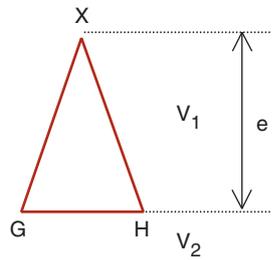
- $T_{\text{OX}} : T_{\text{OFGX}}$: temps de propagation de l'onde entre le tir offset 1 et X (en ms),
- $T_{\text{PX}} : T_{\text{PIHX}}$: temps de propagation de l'onde entre le tir offset 24 et X (en ms),
- $T_{\text{OP}} : T_{\text{OFIP}}$: temps de propagation de l'onde entre les deux tirs offset O et P (en ms).

T_{OX} et T_{PX} sont obtenus directement sur les dromochroniques des deux tirs offset.

Le temps de trajet T_{OP} s'obtient indirectement par le calcul $T_{\text{OP}} = T_{\text{OB}} + T_{\text{PA}} - T_{\text{AB}}$.

La valeur du Plus correspond donc, sur le schéma du dispositif, au triangle suivant :

$$T_{\text{plus}} = T_{\text{GX}} + T_{\text{HX}} - T_{\text{GH}}$$

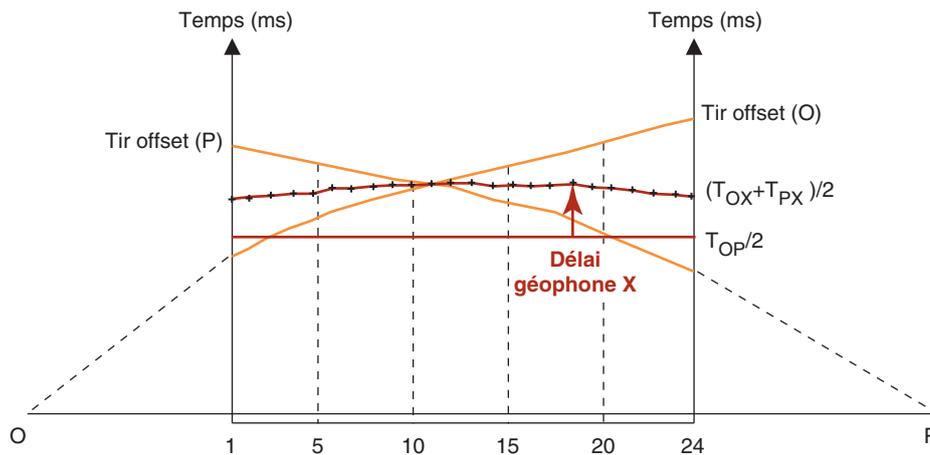


Le délai sismique est égal à $T_{\text{plus}}/2$, soit $(T_{\text{GX}} + T_{\text{HX}} - T_{\text{GH}})/2$ et correspond donc à la moitié du triangle.

Cette valeur peut être obtenue en travaillant directement sur les dromochroniques des deux tirs offset (Fig. 31).

FIGURE 31

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DU « PLUS ».



Le calcul de la base $T_{\text{OP}}/2$ est parfois assez délicat.

Néanmoins, un calage assez simple peut être effectué en prenant comme référence la valeur du délai (intercept/2) obtenu au niveau des tirs en bout et du tir au centre.

On obtient ainsi le délai sismique relatif au substratum en chaque point de réception. Dans ce délai, le poids des terrains de surface ayant des vitesses lentes peut être assez fort. Dans la majorité des cas, on peut même affirmer que ce sont ces terrains de surface, à l'exclusion des autres, qui déterminent les principales variations de la fonction Plus. De ce fait, il faut rester prudent dans la corrélation du Plus avec la profondeur du substratum.

Cette incertitude peut être en partie levée en gardant à l'esprit que les anomalies du Plus qui correspondent également à des anomalies du Minus sont dues à des variations d'épaisseur ou de nature des couches les plus profondes. Inversement, les variations du Plus qui n'entraînent aucune anomalie du Minus sont dues aux terrains de surface.

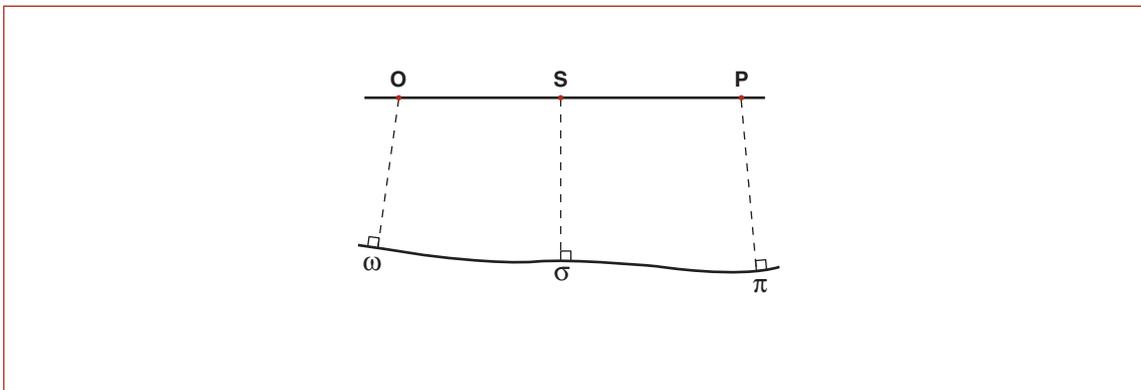
3.4.2. Construction de la courbe Minus

La fonction Minus consiste, à partir des « offset », à déterminer graphiquement la vitesse de fond. Cette construction est particulièrement intéressante lorsqu'on est en présence d'un schéma qui s'éloigne notablement d'un schéma tabulaire simple et lorsque les couches de surface ont des épaisseurs qui varient de façon aléatoire le long du dispositif étudié.

Considérons un schéma à n couches, la vitesse de fond étant V_n , deux tirs lointains en O et P , et des réceptions en des points tels que S sur un dispositif sismique (Fig. 32). On suppose que le temps de propagation des ondes issues de O et P mesuré en S correspond à un trajet réfracté totalement sur V_n . Les normales aux diverses couches, issues de S , P et O aboutissent sur la couche V_n en σ , π , ω .

FIGURE 32

CONSTRUCTION DU MINUS (a).



On peut écrire :

$$t_{OS} - t_{PS} = (D_o + \frac{\omega\sigma}{V_n} + D_s) - (D_p + \frac{\pi\sigma}{V_n} + D_s)$$

$$t_{OS} - t_{PS} = D_o - D_p + \frac{\omega\sigma - \omega\pi + \omega\sigma}{V_n}$$

$$t_{OS} - t_{PS} = D_o - D_p - \frac{\omega\pi}{V_n} + \frac{2\omega\sigma}{V_n}$$

$$M(s) = \frac{t_{OS} - t_{PS}}{2} = C_{ste} + \frac{\omega\sigma}{V_n}$$

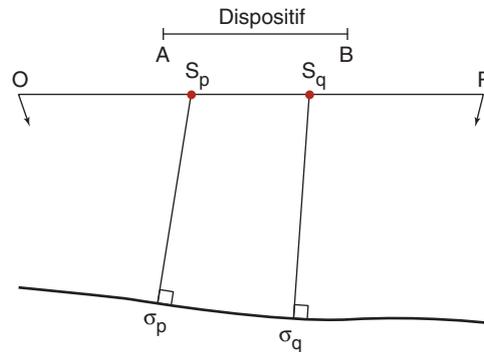
Cette expression $M(s)$ est la fonction Minus du point S .

Elle représente très exactement le temps de trajet par le fond, à une constante près.

Si on considère deux points de réception sur le dispositif, S_p et S_q (Fig. 33), on peut écrire la différence des fonctions Minus $M(S_p) - M(S_q)$. La constante s'éliminant, on obtient :

$$M(S_p) - M(S_q) = \frac{\omega\sigma_p - \omega\sigma_q}{V_n} = \frac{\sigma_p\sigma_q}{V_n}$$

FIGURE 33
CONSTRUCTION DU MINUS (b).



Lorsque les couches ont des pentages relativement faibles, la distance $\sigma_p\sigma_q$ est peu différente de la distance en surface S_pS_q , et on peut écrire $M(S_p) - M(S_q) = S_pS_q/V_n$.

L'assimilation de $\sigma_p\sigma_q$ à S_pS_q revient à dire que le cosinus de l'angle du pendage entre la surface et la fond est égal ou très peu différent de 1.

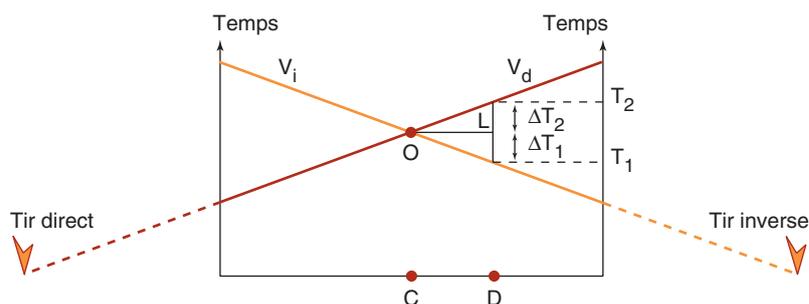
$$M(s_p) - M(s_q) = \frac{S_pS_q}{V_n}$$

Le report de la fonction Minus sur le graphique temps-distance donne par conséquent une droite dont l'inverse de la pente est la vitesse de fond, d'un substratum plan.

C'est à partir de cette propriété, et en faisant la construction Minus point par point, qu'on détectera les anomalies du substratum et de sa vitesse, qui apparaîtront chaque fois que la courbe obtenue s'éloignera d'une droite.

On démontre très facilement que la construction Minus n'est que la traduction graphique du calcul de la moyenne harmonique (Fig. 34) :

FIGURE 34
CONSTRUCTION DU MINUS (c).



Soit :

- V_d la vitesse du substratum sur la portion CD obtenue en tir direct,
- V_i la vitesse du substratum sur la portion CD obtenue en tir inverse,
- V la vitesse moyenne.

$$\frac{2}{V} = \frac{1}{V_i} + \frac{1}{V_d}$$

$$V_d = \frac{L}{\Delta T_2} \quad V_i = \frac{L}{\Delta T_1}$$

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{L} \right)$$

Comme le montre la figure $\Delta T_1 + \Delta T_2 = T_2 - T_1$

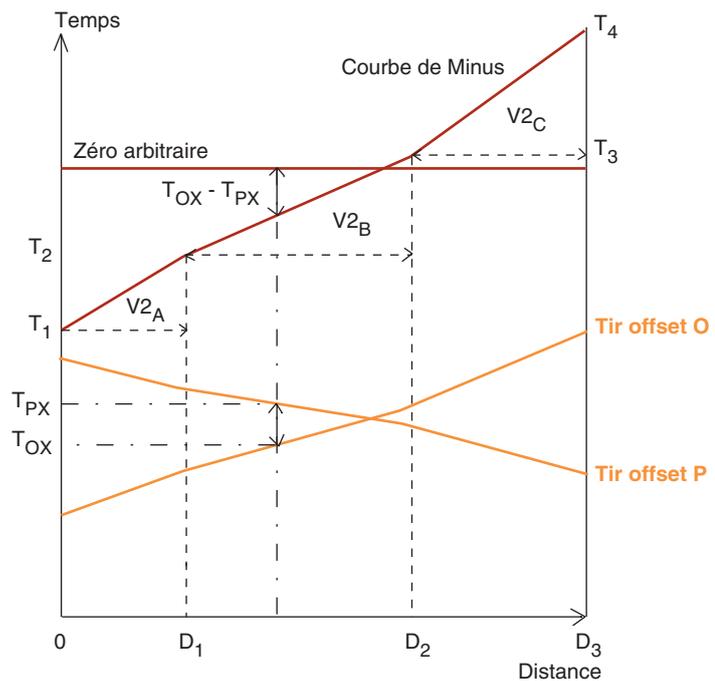
$$\frac{1}{V} = \frac{T_2 - T_1}{2L}, \quad V = \frac{2L}{T_2 - T_1}$$

Il est donc possible en calculant $T_2 - T_1$ à chaque géophone, d'obtenir une courbe donnant la vitesse du substratum.

Ci-après, nous donnons un exemple de construction du Minus.

Pratiquement, on porte sur le graphique de la dromochronique la différence des temps d'offset, point par point et cela par rapport à une base zéro arbitraire. Il s'agit d'un report de valeurs algébriques, la valeur du Minus changeant de signe par rapport à ce zéro arbitraire lorsque les « offset » se croisent (Fig. 35).

FIGURE 35
REPRÉSENTATION GRAPHIQUE
DU MINUS.



Le calcul des vitesses s'effectue pour chaque partie de la courbe de Minus pour laquelle la pente est constante.

Important : La construction du Minus présentée sur la figure 35 donne des pentes correspondant à la $\frac{1}{2}$ vitesse. Il ne faut pas oublier d'appliquer un coefficient 2.

- $V_{2A} = 2 * D_1 / (T_2 - T_1)$,
- $V_{2B} = 2 * (D_2 - D_1) / (T_3 - T_2)$,
- $V_{2C} = 2 * (D_3 - D_2) / (T_4 - T_3)$.

Pour obtenir directement la vitesse, il suffit de reporter $(T_{Ox} - T_{Px})/2$.

Rappelons que la soustraction des temps élimine sur le Minus l'effet des anomalies de surface.

3.4.3. Enseignements tirés de la courbe Minus

On vient de voir que d'une façon très générale, la construction de la courbe Minus permet d'obtenir graphiquement la vitesse de fond. La figure 35 illustre une des propriétés très importantes de cette courbe. On observe que la courbe Minus fait apparaître trois vitesses de fond différentes. Cela est l'application la plus directe et la plus courante de la méthode Minus. Il aurait été assez délicat de mettre en évidence une telle structure par une autre méthode que par cette méthode graphique. On pourra se reporter à l'annexe 4 pour constater qu'il existe d'autres enseignements à tirer des analyses relatives à la courbe Minus.

Rappel des principales recommandations

Pour aboutir à des informations stratigraphiques et structurales fiables, la mise en œuvre et l'interprétation de la sismique réfraction doivent obéir à des règles assez strictes. Il est illusoire de croire qu'on pourrait en faire une énumération exhaustive. Cependant, ces règles sont dictées par un certain nombre de principes de base dont le respect conduit à fournir les résultats les plus conformes à la réalité géologique.

3.4.3.1. Mise en œuvre

- a - S'assurer que la solution du problème géologique ou géotechnique posé peut être efficacement traitée par la sismique réfraction.
- b - À partir des données et des objectifs, définir les orientations et mailles des profils.
- c - Calculer à partir des hypothèses de structure et de profondeur les meilleures longueurs des dispositifs unitaires, fixer les distances entre capteurs et la maille des impacts.
- d - Choisir (estimer ou calculer) les distances d'offset permettant de reconnaître le substratum de l'étude.
- e - Choisir, en tenant compte des contraintes d'environnement, la source sismique la mieux adaptée au site et à la réponse énergétique des terrains (explosifs, chute de poids, marteau léger avec sommation des signaux, etc.).
- f - Faire les relevés topographiques nécessaires.
- g - Après chaque tir, s'assurer que les informations sont aisément exploitables ; pour cela, s'assurer que les paramètres des enregistrements (filtrages, amplifications, sommations, etc.) sont corrects.

h - Ne pas oublier de remplir correctement les feuilles de tir et de reproduire sur les enregistrements (papier ou support disque ou disquette) la nature et les paramètres de chaque tir.

3.4.3.2. Interprétation sismique

a - Pointer les films (manuellement ou automatiquement) en s'attardant sur toutes les discontinuités de temps entre deux capteurs voisins. En général, les temps évoluent régulièrement et faiblement.

b - Les dromochroniques étant tracées, vérifier toutes les fermeture des temps.

c - Tracer les courbes « Minus » et « Plus » et les contrôler par les intercepts des points de tir.

d - Vérifier l'égalité des délais aux points communs à deux dispositifs.

e - Sur la courbe « Plus » repérer les anomalies sûrement superficielles (faible rayon de courbure).

f - Chercher la loi de vitesse en isolant au mieux des segments de droite sur chaque branche de dromochronique. Ces segments de droite doivent respecter les anomalies de surface (voir le « Plus »).

g - Étudier l'évolution de ces vitesses le long du profil : certains segments de droite peuvent disparaître localement à la faveur de l'amincissement de certaines couches.

h - Les vitesses vraies étant calculées par la moyenne harmonique des vitesses homologues « aller et retour », calculer les profondeurs des couches au droit des points de tir, à partir des délais sismiques.

i - Comparer les structures obtenues avec celles mises en évidence par la courbe Minus et à partir de cette dernière, rectifier et préciser certaines anomalies profondes.

j - Vérifier l'égalité des délais aux intersections des profils.

k - Les interprétations étant terminées, comparer les profils parallèles et voisins ; si un profil présente une discontinuité structurale nette par rapport aux profils adjacents, vérifier les interprétations.

B. INTERPRÉTATION EN TERME DE GÉOLOGIE

3.5. SIGNIFICATION DES VITESSES SISMIQUES, UTILISATION PAR L'INGÉNIEUR

Lorsqu'on définit par sismique réfraction la structure d'un ensemble géologique, les vitesses sismiques sont les paramètres qui séparent les différentes unités de cette structure. On attend de ces vitesses qu'elles offrent des contrastes suffisants pour que la structure apparaisse avec le maximum de finesse. Mais les vitesses sismiques ont une fonction bien plus importante que ce simple moyen mis à notre disposition pour définir les structures. Les ingénieurs familiarisés avec ce paramètre ont appris à le manier avec la même aisance que d'autres paramètres géotechniques. Un ingénieur de barrage fera la différence entre un rocher de fondation ayant une vitesse de 5 500 m/s et un rocher ayant une vitesse de 4 000 m/s. De même, au sein d'un rocher à 5 500 m/s,

un compartiment fracturé ayant une vitesse de 3 000 m/s attirera toute son attention. On parvient même, sur un site déterminé, à corrélérer des vitesses sismiques et des perméabilités LUGEON.

Il faut signaler que dans le cas des roches, les variations de la vitesse des ondes de cisaillement rend mieux compte des variations de la rigidité que celles des ondes de compression.

Le tableau V donne un ordre de grandeur de la gamme des vitesses des principales formations géologiques. On remarquera, pour les formations sans cohésion ou à cohésion faible, la différence importante existant entre les vitesses sismiques sous nappe et hors nappe.

La capacité de la sismique réfraction à détecter les limites entre formations dépend des contrastes de vitesses sismiques. L'observation des valeurs du tableau V fait apparaître que la localisation de certaines limites est très délicate, quelquefois impossible. Citons en particulier le cas d'alluvions propres sous nappe surmontant un calcaire fracturé, ces deux formations ayant des vitesses sismiques très proches de l'ordre de 2 000 m/s.

TABLEAU V

VITESSES SISMIQUES DES PRINCIPALES FORMATIONS GÉOLOGIQUES

Nature de la formation	Vitesse des ondes de compression m/s		Masse spécifique en T/m ³	
	Hors nappe	Sous nappe	Hors nappe	Sous nappe
Terre végétale	250-350			
Éboulis	300-700	1500-2500	1,5-2	2-2,3
Sable fin	300-700	1450-1700	1,4-1,6	1,9-2
Graves	500-900	1700-2300	1,6-2,1	2-2,3
Argile	500-1400	1400-1700	1,3-1,7	1,8-2,1
Marnes	1800-2100	2100-3000	1,5-2,1	1,9-2,3
Grès	800-3000	2000-4000	1,6-1,9	2-2,2
Craie fracturée	800-1500	1700-2300	1,7-1,9	2,1-2,2
Craie saine	1800-2500	2300-3200	1,9-2,1	2,2-2,3
Calcaire fracturé	900-2000	1700-3000	2-2,2	2,2-2,5
Calcaire compact	3000-5000	3500-5000	2,3-2,4	2,4-2,5
Granite fracturé	1000-2500	2500-4500	1,8-2,1	2,1-2,3
Granite sain	4500-5500	4500-5500	2,3-2,5	2,4-2,6
Gneiss fracturé	1000-2500	2500-4500	1,9-2,2	2,2-2,5
Gneiss sain	5000-6000	5000-6000	2,3-2,6	2,5-2,7
Basalte fracturé	800-2500	2300-4500	1,7-2,1	2,1-2,3
Basalte sain	5500-6000	5500-6000	2,5-2,8	2,6-3
Quartzite fracturé	700-2500	1800-3500	1,6-2,1	2-2,3
Quartzite sain	3000-4500	3500-5000	2,3-2,4	2,4-2,5
Schiste altéré	500-2000	1700-2500	1,3-2,2	1,8-2,4
Schiste sain	2500-4500	3000-4500	2,1-2,5	2,3-2,6
Gypse	1000-3500		1,8-2,4	
Glace	3500-4000	3500-4000	0,95	
Nappe d'eau libre	1450-1500	1450-1500	1	

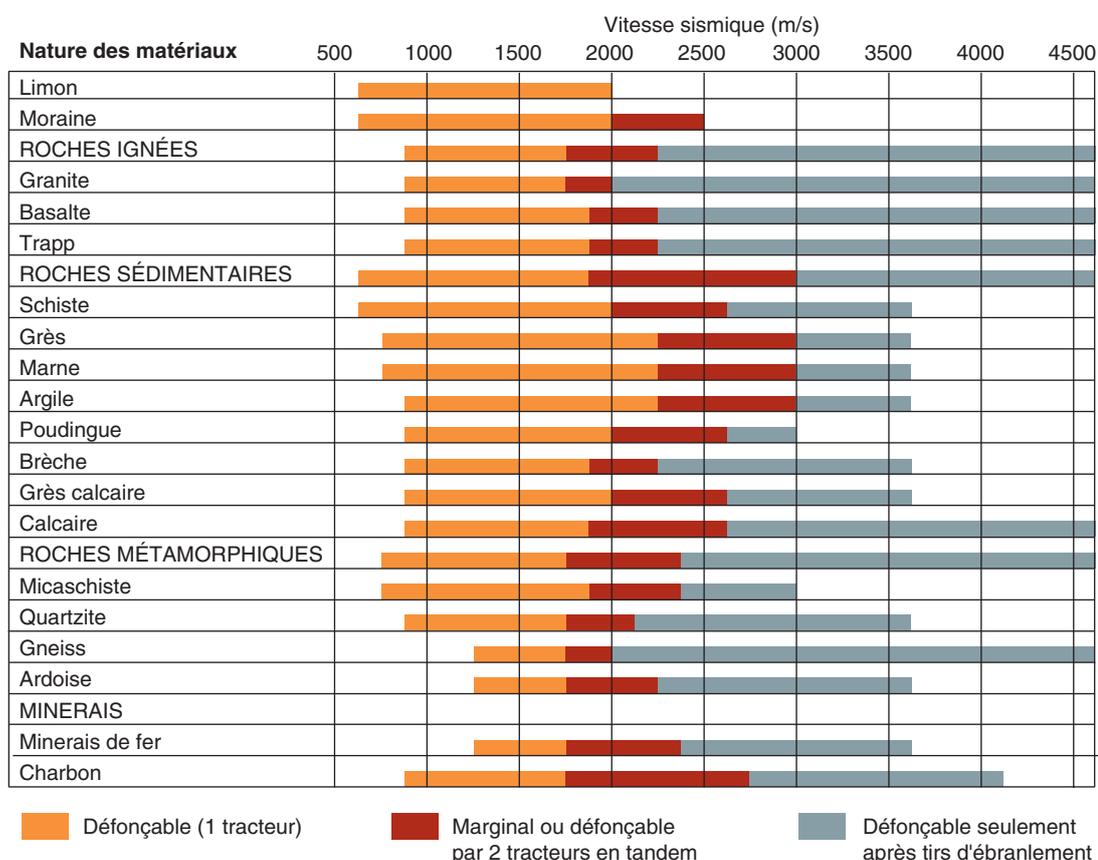
À l'inverse, dans une même formation sans cohésion (sable, graves propres), le niveau hydrostatique peut être localisé en raison du contraste de vitesses de part et d'autre de ce niveau (700 contre 1900 m/s).

Sur les tracés linéaires (autoroutes, lignes ferroviaires), les déblais sont étudiés par sismique réfraction, et les moyens mis en œuvre pour les terrassements peuvent être prévus par la connaissance des vitesses sismiques (Fig. 36). Cette dernière application est d'autant plus performante que les géotechniciens ont pu étalonner localement ces vitesses à l'expérience de chantiers en vraie grandeur.

FIGURE 36

TABLE CATERPILLAR POUR TRACTEUR D 9G (390 CV) AVEC DÉFONCEUSE 9B UNE DENT.

TIRÉE DE L'OUVRAGE : *RECONNAISSANCE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE DES TRACÉS DE ROUTES ET AUTOROUTES* ÉDITÉ PAR LE LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES EN 1982.



3.6. MARCHE À SUIVRE

La marche à suivre pour fournir au maître d'œuvre des indications lithologiques en termes de géologie passe toujours par deux phases dont l'importance dépend du type de résultats demandés.

a - Étude préliminaire pour caractériser un site avec des moyens légers excluant à court terme des reconnaissances mécaniques

Les résultats sismiques doivent être confrontés avec tous les éléments géologiques collectés sur place ou sur cartes et avec les connaissances tirées de prospections de

même type dans des sites comparables. Sans aucun forage d'étalonnage, mais avec des réflecteurs sismiques bien caractérisés et une géologie générale simple et bien connue, l'interprétation géologique consiste en une détermination correcte des profondeurs dont la précision est en général assez bonne.

b - Étude sismique suivie de forages d'étalonnage

Une première interprétation purement sismique est effectuée et les résultats remis au maître d'œuvre avec, à sa demande, des observations géologiques comme indiqué en a). Les conclusions de cette phase de l'étude doivent comporter des recommandations sur le positionnement des forages de reconnaissance.

Une réinterprétation est faite ensuite, les forages de reconnaissance permettant de mettre un nom géologique sur les couches sismiques et comparant en terme de profondeur forages et limites sismiques. Un réexamen des chronochroniques doit être entrepris en particulier dans les zones où des écarts importants, supérieurs à la marge d'erreur admissible, sont constatés.

Pour cela, les courbes minis doivent être réétudiées, analysées plus finement en faisant appel aux notions indiquées dans l'annexe 4 de cet ouvrage. De même, le calcul des profondeurs peut être affiné en tenant compte de couches éventuellement cachées par manque de contrastes sismiques ou épaisseurs trop faibles.

Le document finalement remis ne doit en aucun cas « gommer » un écart sismique-forage inexplicable et ininterprétable. En effet, un forage peut détecter très localement une petite anomalie lithologique, invisible en sismique, dont la prise en compte éventuelle altérerait une structure par ailleurs bien définie.

3.7. RECOMMANDATIONS

L'interprétation géologique est très souvent délicate, car elle doit être faite par un géologue bien au fait du degré de liberté que lui offrent les résultats de l'interprétation sismique. La correspondance entre les faciès géologiques et les horizons sismiques n'est pas toujours évidente.

Il est fortement conseillé de caler l'interprétation finale à l'aide de sondages mécaniques d'étalonnage qui seront judicieusement positionnés sur la base des résultats des premières coupes sismiques interprétées.

Les corrélations entre horizons sismiques et faciès géologiques seront effectuées sur la base des résultats de ces sondages.

Nous recommandons aux donneurs d'ordre de prévoir le plus souvent possible un budget de réinterprétation des coupes sismiques, afin de laisser au géophysicien la possibilité de recalibrer son interprétation sur la base de toutes les informations complémentaires que peut lui apporter la campagne de sondages.

Chapitre 4

Applications - Cas concrets



4.1. Exemple d'interprétation par la méthode du « Plus-Minus »	56
4.2. Autoroute A 43 - Lac du Viviers	59
4.3. Nouveau tunnel du col de Tende	63

Chapitre 4.

Applications - Cas concrets



4.1. EXEMPLE D'INTERPRÉTATION PAR LA MÉTHODE DU « PLUS-MINUS »

Ce paragraphe permet de se familiariser avec l'interprétation « Plus-Minus » sur un dispositif sismique 24 traces, 5 tirs.

Le tableau VI donne l'ensemble des temps de premières arrivées enregistrés.

TABLEAU VI

VALEUR DES TEMPS DE PREMIÈRE ARRIVÉE

Récepteur	Offset 1 T_{OX}	Bout 1 T_{AX}	Offset 24 T_{PX}	Bout 24 T_{BX}	Centre T_{CX}	$(T_{OX} + T_{PX})/2$	$(T_{OX} - T_{PX})/2$
1	54	4	127	102	61	90,5	-36,5
2	61	30	126	102	60	93,5	-32,5
3	64	38	125	99	58	94,5	-30,5
4	67	41	120	95	54	93,5	-26,5
5	67	41	114	89	49	90,5	-23,5
6	77	51	119	93	53	98	-21
7	81	54	114	89	50	97,5	-16,5
8	82	55	109	85	45	95,5	-13,5
9	89	61	110	87	47	99,5	-10,5
10	89	60	104	80	40	96,5	-7,5
11	88	62	100	76	30	94	-6
12	87	59	94	70	11	90,5	-3,5
13	90	62	91	68	15	90,5	-0,5
14	90	65	87	64	27	88,5	1,5
15	101	75	93	69	42	97	4
16	101	75	89	66	44	95	6
17	105	79	89	65	48	97	8
18	102	77	80	57	44	91	11
19	104	80	80	56	47	92	12
20	107	82	79	54	50	93	14
21	112	87	80	55	55	96	16
22	115	91	78	52	58	96,5	18,5
23	115	92	74	35	59	94,5	20,5
24	121	98	73	5	64	97	24

Les valeurs portées en caractères gras dans les deux dernières colonnes permettent de construire les deux courbes de « Plus » et de « Minus ».

□ L'avant dernière colonne correspond au temps duquel il faudra retrancher $T_{OP}/2$ pour obtenir le Plus/2 qui correspond au délai calculé au droit de chaque capteur.

□ La dernière colonne permet de reconstituer la courbe du « Minus » à partir de $(T_{OX} - T_{PX})/2$. On rappellera que la vitesse de fond s'obtient soit directement en reportant la demi-différence $(T_{OX} - T_{PX})/2$, soit en multipliant par deux la vitesse obtenue par la simple différence $T_{OX} - T_{PX}$.

Les dromochroniques correspondant à ce dispositif sont représentées sur la figure 37.

La figure 38 présente le résultat de l'interprétation de ces dromochroniques par la méthode du « Plus-Minus ».

Les deux courbes permettant le calcul du délai (Plus/2) sont en rouge, et la courbe donnant les vitesses de fond (Minus) est portée en orange.

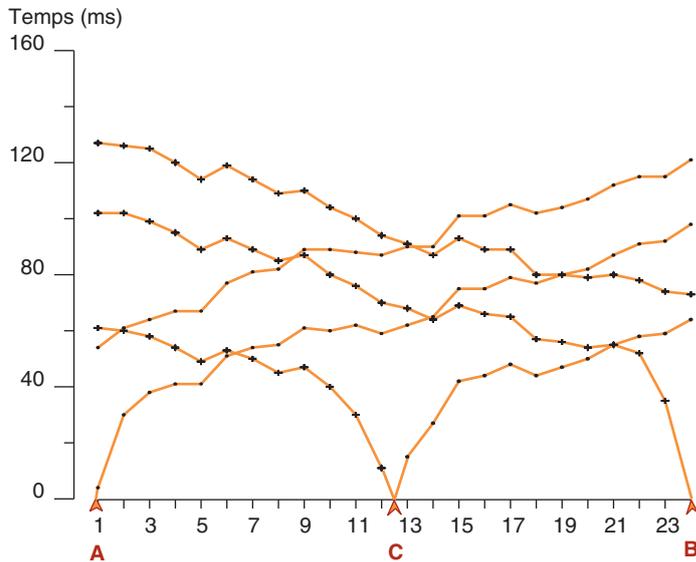


FIGURE 37
DOMOCHRONIQUES ASSOCIÉES AUX VALEURS DE POINTÉS DU TABLEAU VI.

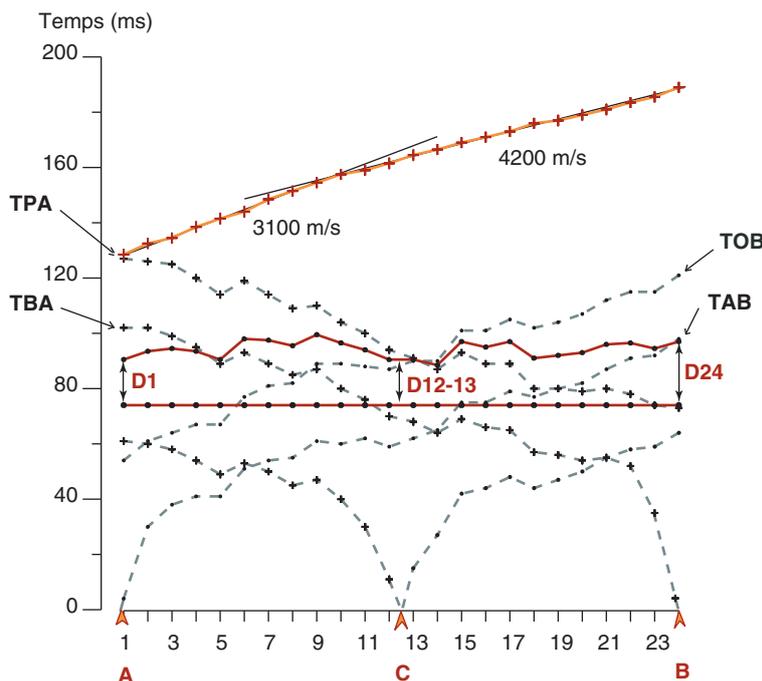


FIGURE 38
EXEMPLE D'INTERPRÉTATION PAR LA MÉTHODE DU « PLUS-MINUS ».

La base du « Plus » ou $T_{OP}/2 = (T_{OB} + T_{PA} - T_{AB})/2$.

T_{OB} = temps d'arrivée du tir offset 1 sur le capteur 24 = 121 ms,

T_{PA} = temps d'arrivée du tir offset 24 sur le capteur 1 = 127 ms.

En vertu de la règle des temps réciproques selon laquelle $T_{AB} = T_{BA}$ on prendra la moyenne de ces deux temps = $(98 + 102)/2 = 100$ ms.

Ce qui nous donne finalement $T_{AE}/2 = (121 + 127 + 100) = 74$ ms.

La valeur du délai au droit du capteur 1 = $90,5 - 74 = 16,5$ ms.

La valeur du délai au droit du capteur 24 = $97 - 74 = 23$ ms.

On notera que ces valeurs de délai correspondent bien à la valeur de l'intercept/2 obtenue au droit de ces deux tirs.

Une des techniques simples pour obtenir la valeur de l'intercept au droit des tirs en bout consiste à dessiner à l'aide d'un compas le prolongement fictif de la dromochronique en reproduisant la forme du tir offset jusqu'au droit du tir.

La courbe du « Minus » nous donne deux vitesses de fond bien différenciées :

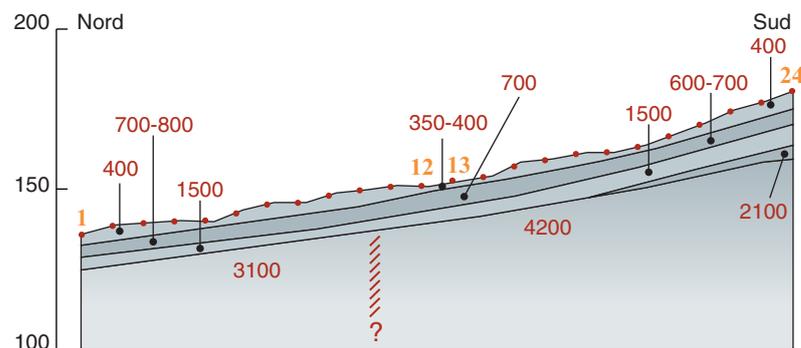
- 3 100 m/s sous les capteurs 1 à 10,
- 4 200 m/s sous les capteurs 11 à 24.

Cette faible vitesse de 3 100 m/s peut s'expliquer de plusieurs façons :

- changement de faciès géologique : passage par exemple d'un calcaire sain à 4 200 m/s à un calcaire plus marneux à 3 100 m/s,
- fracturation plus importante de la même formation géologique,
- présence d'une surépaisseur d'altération au toit du substratum entraînant un plongement rapide du 4 200 m/s.

La figure 39 présente la coupe interprétative correspondant à ce dispositif.

FIGURE 39
COUPE INTERPRÉTATIVE.



La sismique réfraction a donc permis de mettre en évidence :

- les secteurs de faible recouvrement caractérisés par les délais les plus faibles,
- les secteurs de rocher sain caractérisés par les vitesses de fond élevées,
- les secteurs où le substratum présente de faibles vitesses de fond.

L'interprétation en terme de géologie se fera après réalisation de quelques sondages mécaniques d'étalonnage qui permettront, d'une part de caler précisément la position du toit des différents horizons, et d'autre part d'identifier le substratum présentant des vitesses plus faibles.

4.2. AUTOROUTE A 43 - LAC DU VIVIERS

Cette étude par sismique réfraction marine s'est effectuée dans le cadre des reconnaissances relatives au projet du tunnel d'Hurtières situé près d'Aiguebelle.

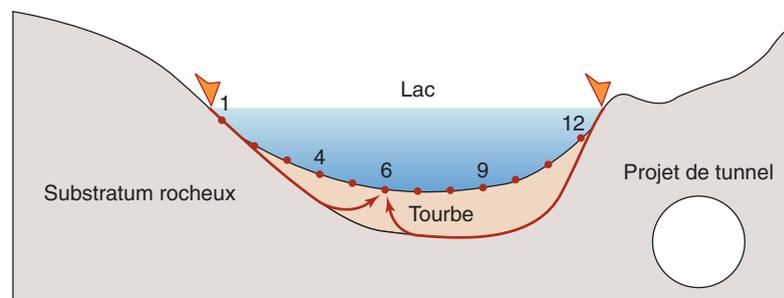
Le tunnel passant à proximité d'un plan d'eau (lac du Viviers), il était important de vérifier qu'il ne pouvait pas y avoir de risques de fuites pouvant perturber l'avancement du creusement (Fig. 40).

L'objectif principal était donc de caractériser la position du toit du substratum afin :

- de déterminer l'épaisseur de tourbe constituant le fond du lac,
- de préciser l'épaisseur de recouvrement au toit du tunnel,
- de contrôler qu'aucune discontinuité géologique n'affectait la continuité du substratum rocheux.

FIGURE 40

LAC DU VIVIERS - PLAN DE PRINCIPE.



Programme

Six dispositifs de 120 m, vingt-quatre traces ont été réalisés (cf. plan de position des profils, Fig. 41).

Quatre tirs ont été effectués pour chaque dispositif : deux en bout et deux en offset à des distances assez courtes compte tenu de la topographie du site.

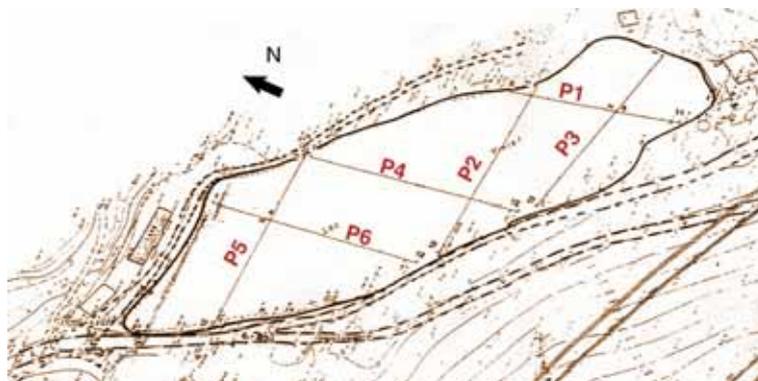
Le tir au centre n'a pas été effectué afin de préserver la faune et la flore du lac.

Les flûtes sismiques étaient posées directement sur le fond du lac afin :

- d'améliorer le rapport signal/bruit,
- d'éviter l'imprécision que pourrait engendrer des vases ayant des vitesses proches voire inférieures à celle de l'eau (1500m/s).

FIGURE 41

LAC DU VIVIERS - PLAN DE POSITION DES PROFILS.



Matériel

- Hydrophones MP 24 Mark Products, 10 Hz.
- Enregistreur Geometrics Strataview.
- Source non destructive de type chute de poids Delmag pour les tirs offset et en bout effectués à terre.

Interprétation

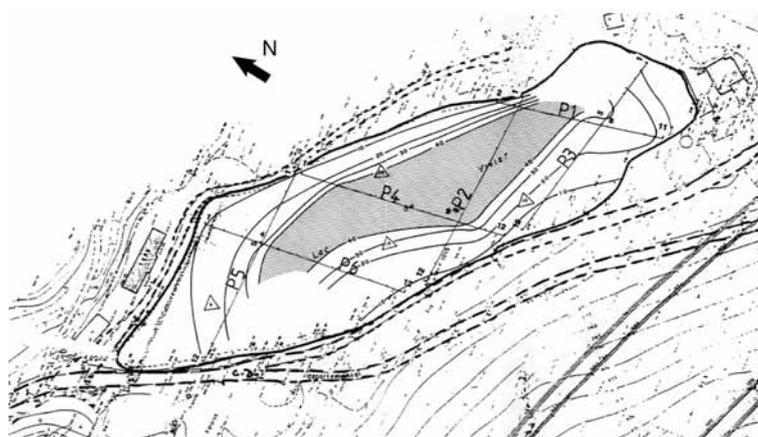
L'interprétation s'est faite par la méthode du « Plus - Minus ».

La valeur du délai ou « Plus/2 » a été calculée au droit de chaque capteur.

La carte des délais ainsi obtenue est représentée sur la figure 42.

FIGURE 42

LAC DU VIVIERS - CARTE DES DÉLAIS.



- Délai : temps de trajet de l'onde entre le toit du substratum et le fond du lac
- Courbe d'isovaleurs de délais (ms)
- △ Pénétromètre
- Zone de délais supérieurs à 40 ms

Cette carte met en évidence un surcreusement du toit du substratum dont l'axe est matérialisé par la figuration en grisé des délais supérieurs à 40 millisecondes.

On remarquera que ce sillon, qui semble au premier abord suivre l'axe du lac, effectue en fait un « S » en évitant les deux extrémités de la retenue.

Le passage des valeurs de délais aux profondeurs nécessitait de connaître la vitesse moyenne de déplacement des ondes sismiques dans la tourbe constituant l'horizon intermédiaire entre le toit du substratum rocheux et le fond du lac.

Cette vitesse a été obtenue grâce à la corrélation entre la carte des délais et les résultats de quatre pénétrromètres effectués dans la retenue.

Alors que l'on pouvait raisonnablement s'attendre à une valeur au moins égale à celle correspondant à la vitesse de déplacement d'une onde sismique dans l'eau (1 500 m/s), la corrélation nous a systématiquement donné une valeur beaucoup plus faible égale à 500 mètres par seconde.

À titre d'exemple le pénétrromètre TIP3 qui a trouvé le toit du rocher à 20 m, est implanté à proximité de la courbe d'isovaleur de délais de 40 millisecondes.

Cette faible vitesse a finalement pu s'expliquer par la teneur en gaz de décomposition de la tourbe qui est un matériau fortement organique.

Une étude réalisée par Bonnet et Meyer en 1988 a d'ailleurs montré que les vitesses de déplacement des ondes longitudinales sont très sensibles à la teneur en gaz des sols.

Une estimation théorique à partir du modèle de Biot montre qu'il suffit d'une très faible teneur en gaz pour faire chuter la vitesse des ondes sismiques dans un milieu sous nappe à 350 mètres par seconde.

L'ensemble des coupes interprétatives a donc été élaboré à partir de cette vitesse de 500 m/s.

La figure 43 présente les coupes des profils 5 et 6.

On notera la présence du surcreusement mis en évidence sous le centre du profil 6.

La profondeur donnée est une profondeur minimale compte tenu des limites de la sismique qui suit les lois de l'optique.

Cette limitation est illustrée par la figure 44, où la zone « d'ombre » est fixée par la distance minimale entre les capteurs et le rocher présent latéralement.

Pour des profondeurs supérieures à celles définies par l'arc de cercle, l'arrivée première arrivera directement par la tourbe.

Conclusions

Cette étude par sismique réfraction a permis de mettre en évidence un surcreusement du toit du substratum situé sous l'emprise du lac du Viviers.

L'axe de ce surcreusement a pu être suivi précisément grâce à l'établissement de la carte des délais (calcul du « Plus »).

Le calcul du « Minus » a permis d'identifier un substratum caractérisé par des vitesses évoluant entre 3 400 et 4 000 m/s. Cette fourchette de valeur est probablement liée à l'anisotropie du massif donnant des vitesses de 3 400 m/s suivant l'axe Est Ouest et 4 000 m/s suivant l'axe Nord Sud.

On notera que la réalisation des pénétrromètres d'étalonnage a permis d'éviter une grosse erreur d'interprétation lors de l'établissement de la coupe interprétative en vitesses et profondeurs, cela en permettant d'affecter à la tourbe des vitesses particulièrement faibles de 500 mètres par seconde.

FIGURE 43
LAC DU VIMERS -
COUPES INTERPRÉTATIVES.

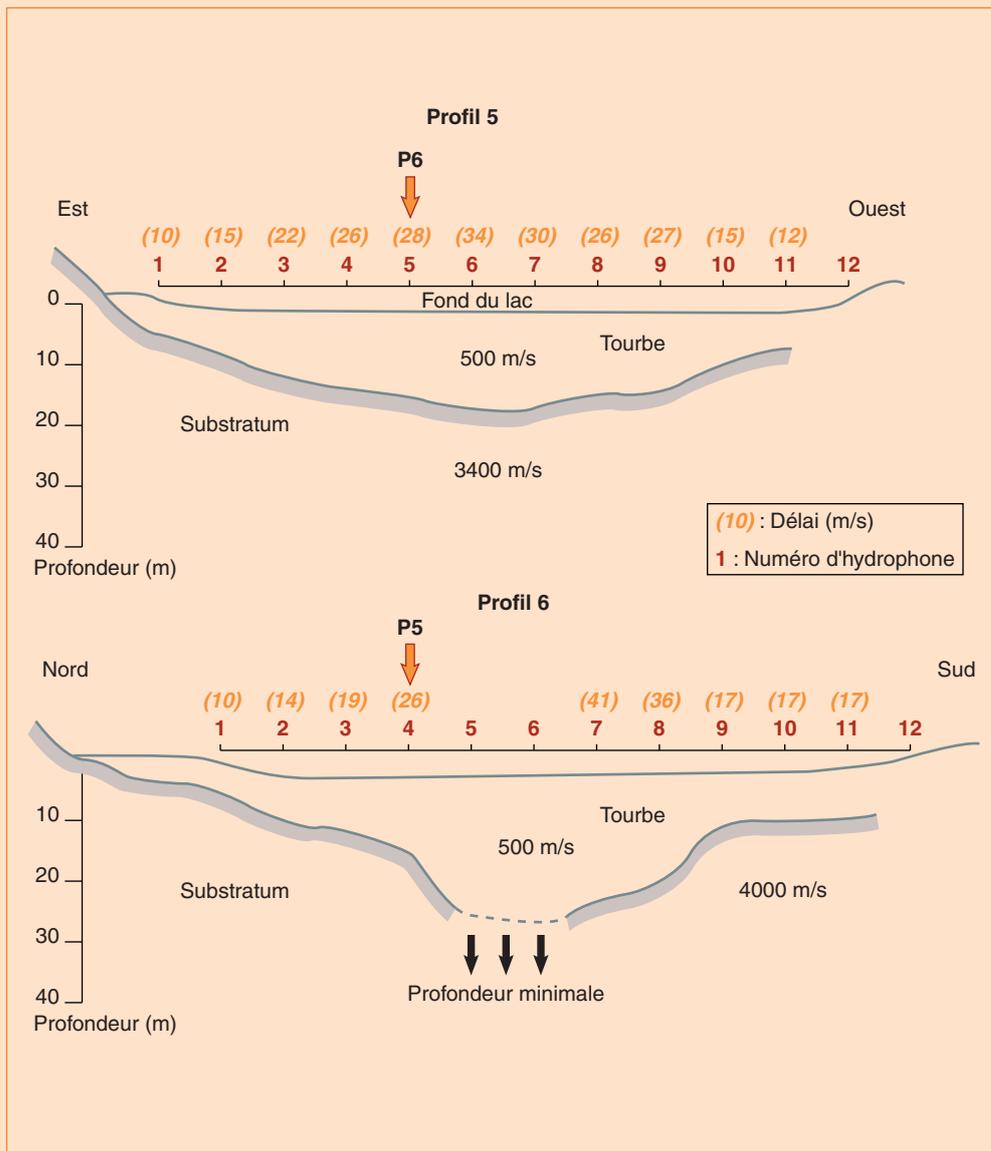
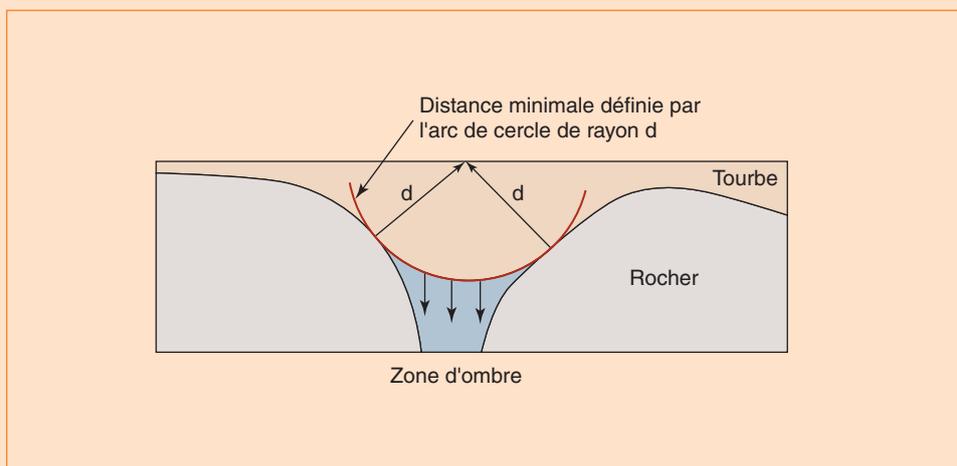


FIGURE 44
LIMITE D'INVESTIGATION LIÉE
AUX LOIS DE L'OPTIQUE.



On rappellera à cette occasion qu'il est fortement recommandé de prévoir une reconnaissance complémentaire par un ou plusieurs sondages mécaniques afin de valider les hypothèses d'interprétations prises par le géophysicien.

Les résultats de ces sondages serviront de support à l'interprétation en termes géologiques, et permettront ainsi d'établir des corrélations fiables entre horizons sismiques et faciès géologiques.

4.3. NOUVEAU TUNNEL DU COL DE TENDE

Cette étude s'est effectuée dans le cadre du programme des reconnaissances relatives à une des variantes possibles du nouveau tunnel du Col de Tende situé dans les Alpes-Maritimes.

Cette reconnaissance a été réalisée en deux phases :

Une première phase d'étude par sismique réfraction dont l'objectif était d'étudier les épaisseurs et les vitesses des différents horizons sismiques situés au niveau de la tête d'entrée du versant Sud.

Une deuxième phase de reconnaissance par quatre sondages carottés implantés sur la base des résultats de la sismique. Des mesures microsismiques ainsi que deux cross-holes ont été effectués dans ces sondages afin de caler l'interprétation sismique.

Programme des reconnaissances sismiques

Quatre profils ont été réalisés, dont le plus long TDS4 d'une longueur de 400 m a été implanté suivant l'axe du projet (Fig. 45). L'intertrace ou distance entre capteurs était de 10 mètres.

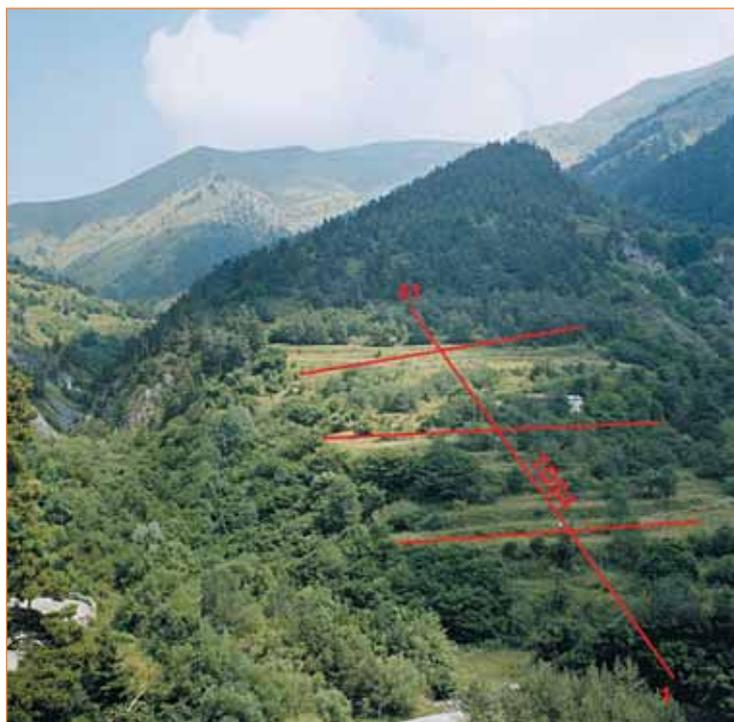


FIGURE 45

TUNNEL DE TENDE -
PLAN DE POSITION DU PROFIL TDS4.

Matériel

Géophones SM4 10 Hz Sensor.
 Enregistreur Geometrics Strataview.
 Source : explosif.

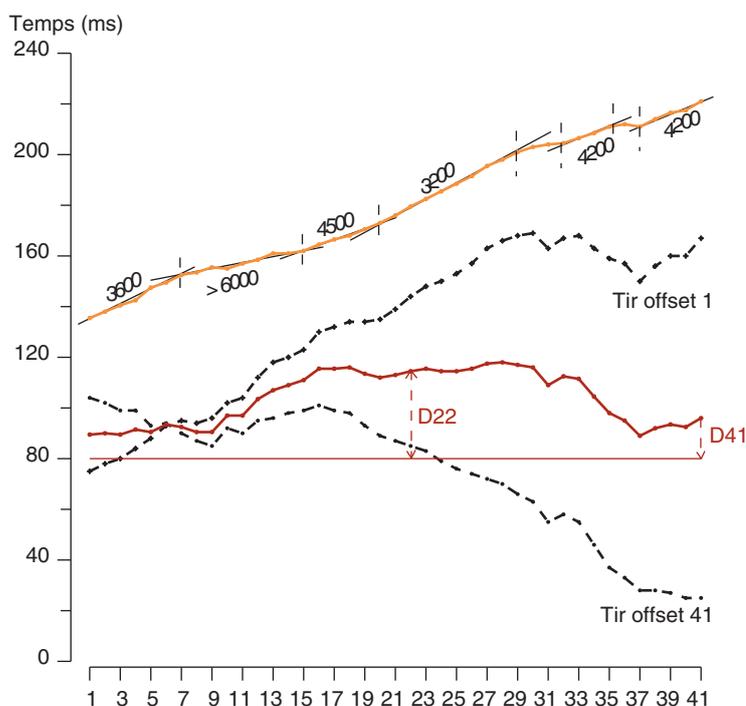
Interprétation

La figure 46 présente le résultat de l'interprétation de TDS4 par la méthode du « Plus-Minus ».

La courbe donnant la valeur du délai (Plus/2) est en rouge, et la courbe donnant les vitesses de fond est en orange (Minus).

FIGURE 46

TUNNEL DE TENDE - INTERPRÉTATION PAR LA MÉTHODE DU « PLUS-MINUS ».



On notera que la courbe du Plus met en évidence des valeurs de délais très élevées dans la partie centrale du profil, avec plus de 30 ms entre les capteurs 15 et 30. Ces surdélais sont liés à la présence d'un plongement important du substratum.

Ce plongement s'accompagne d'une surépaisseur de terrains présentant des vitesses intermédiaires de 2 000 à 2 400 mètres par seconde.

La courbe de Minus est quant à elle très chahutée et met en évidence des vitesses de fond qui semblent évoluer très rapidement dans une fourchette allant de 3 200 à 6 000 mètres par seconde.

On notera en particulier :

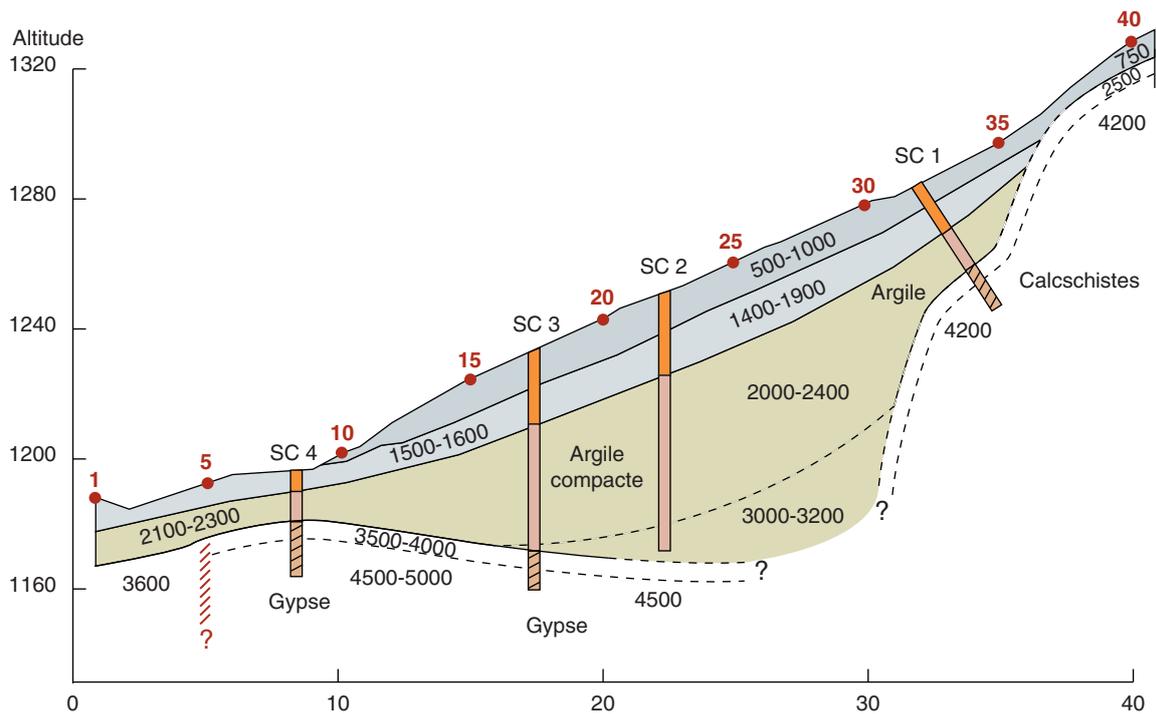
- La présence entre les capteurs 7 et 15 d'une vitesse anormalement élevée de 6 000 m/s vraisemblablement liée, comme cela est décrit en annexe 4 à une forme en dos d'âne du substratum.
- La présence d'une vitesse de fond élevée de 4 500 m/s entre les capteurs 15 et 21.
- La présence d'une vitesse de fond plus faible de 3 200 m/s entre les capteurs 21 et 29, correspondant d'ailleurs au secteur où la courbe de délai présente des valeurs de plus de 30 millisecondes.
- La présence en fin de profil de vitesses plus élevées de 4 200 m/s correspondant au secteur où la courbe de délai remonte très rapidement pour revenir à des valeurs évoluant entre 10 et 15 millisecondes.

Quatre sondages carottés ont été implantés sur la base de la courbe du Plus afin d'identifier les causes de la présence d'importants délais dans la partie centrale du dispositif, et de caractériser les changements de vitesses de fond.

La coupe interprétative du dispositif obtenue après corrélation avec les quatre sondages est présentée sur la figure 47.

FIGURE 47

TUNNEL DE TENDE : COUPE INTERPRÉTATIVE.



On notera que les sondages ont confirmé la présence d'un plongement rapide du substratum sous le centre du dispositif.

La géométrie de ce surcreusement est impossible à déterminer avec précision compte tenu des limites des lois de l'optique ; on se retrouve en effet avec une zone « d'ombre » située sous les capteurs 20 à 30, correspondant à la distance pendant laquelle les vitesses de fond sont faibles et égales à 3 200 m/s. Compte tenu des résultats de SC2 qui n'a rencontré que de l'argile ocre avec alternance de dolomie et

cargneule, et cela jusqu'à 80 m de profondeur, il est fort probable que ces vitesses de 3 000-3 200 m/s ne correspondent en fait qu'aux argiles ocre avec blocs s'étant fortement compactées, compte tenu des fortes épaisseurs de recouvrement.

Le substratum à 4 500-5 000 m/s présent sous les capteurs 4 à 20 a été identifié par SC3 et SC4 comme étant du gypse et anhydrite blanc-gris. On notera que le toit de ce gypse s'approfondit à l'inverse de la topo qui elle remonte rapidement.

Cette « remontée » des gypses explique les vitesses de fond anormalement élevées de 6 000 m/s observées sous les capteurs 7 à 15 (forme en dos d'âne).

Les résultats des mesures microsismiques réalisées dans SC4 nous ont permis de préciser l'évolution des vitesses dans la frange altérée et fracturée de ce substratum gypseux avec des vitesses de 3 500-4 000 m/s entre 13 et 14 m, évoluant ensuite entre 500 m/s entre 14 et 19 m.

Les résultats du cross-hole réalisé à partir de SC3 sont en parfaite corrélation avec la coupe sismique initiale, avec du 650 m/s à 3m, du 1 000 m/s à 6 m, du 1 300-1 400 m/s à 9 et 12 m, du 1 600-1 700 m/s à 15 et 18 m, et des valeurs évoluant entre 1 700 et 2 300 m/s entre 20 et 30 m soit au niveau de la sur-épaisseur de terrains à 2 000-2 400 m/s mise en évidence par la réfraction.

Le substratum présentant des vitesses de 4 200 m/s en fin de profil a pu être identifié par le sondage SC1 comme étant des calcschistes rubanés et très plissés.

Conclusions

Cette étude aura permis :

- d'identifier un important surcreusement du substratum situé juste au niveau du secteur où était projeté la réalisation de la tête d'entrée Sud du nouveau tunnel,
- d'identifier la présence d'un important môle d'anhydrite qui avait d'ailleurs déjà été rencontré lors de la réalisation du tunnel actuel.

CONCLUSIONS



La sismique réfraction est un outil particulièrement efficace utilisée dans le cadre de nombreux projets de génie civil, de prospection minière, d'hydrogéologie, d'environnement ou d'archéologie.

Sa rapidité de mise en œuvre et son coût raisonnable en font un outil indispensable à l'optimisation d'un programme de reconnaissance, en permettant en particulier aux maîtres d'œuvre d'optimiser le nombre et la position des sondages mécaniques.

On l'utilisera en génie civil pour résoudre deux types de problèmes :

➤ Cartographier l'évolution de la position du toit du substratum au droit du profil réalisé, mais aussi le caractériser en terme de vitesses de déplacement des ondes afin de repérer d'éventuels changements de faciès ou accidents géologiques en perturbant la continuité. Cette information sera particulièrement recherchée dans le cadre de l'implantation d'ouvrages d'art souterrains types stockages ou tunnels, ainsi que dans le cadre des ouvrages fondés aux rochers types barrages ou centrales nucléaires.

➤ Caractériser la vitesse des terrains de recouvrement afin d'estimer le degré de rippabilité des sols. En effet, les moyens à mettre en œuvre pour les terrassements peuvent être définis par la connaissance des vitesses sismiques. Cette dernière application est d'autant plus performante que les géotechniciens ont pu étalonner localement ces vitesses à l'expérience de chantiers en vraie grandeur. On utilisera donc cette information dans le cadre des chantiers impliquant la réalisation d'importants déblais types routes, voies ferrées ou dragages portuaires.

On l'appliquera en hydrogéologie pour la recherche de niveaux de nappe au sein des terrains sédimentaires, ou pour la recherche de zones fracturées pouvant servir de réservoirs potentiels.

Son application en association avec d'autres techniques est en pleine expansion dans le domaine de l'environnement où la prévention des risques de type glissement de terrains, effondrements de cavités ou pollution des sols est un enjeu majeur pour les années à venir.

La sismique réfraction peut aussi servir à caractériser les modules d'élasticité dynamique des sols. La connaissance des vitesses d'onde P et d'ondes S permet en effet de calculer le coefficient de Poisson, ainsi que les modules de compression et de cisaillement des sols (cf. annexe 2).

Cependant, la réussite d'une prospection par sismique réfraction dépendra beaucoup du soin qui aura été apporté au choix du matériel utilisé, à la réalisation des mesures et à leur interprétation. Le maintien d'un bon niveau de prestations dans un environnement où le prix est malheureusement de plus en plus souvent le premier argument retenu pour la sélection des prestataires, on ne saurait trop recommander aussi bien aux praticiens qu'aux donneurs d'ordres de faire effectuer un contrôle de qualité à tous les échelons de l'étude.

BIBLIOGRAPHIE



- HAGEDOORN G.J., *The Plus-Minus method of interpreting seismic refraction sections*, Geophysical Prospecting, **7**, pp. 158-182, **1959**.
- CAGNIARD L., *Reflection and refraction of Progressive Seismic Waves*, Mc Graw-Hill N.Y., **1962**.
- GREEN R., *The hidden layer problem*, Geophysical prospecting, **10**, pp. 166-70, **1962**.
- Caterpillar Tractor Co, *Handbook of ripping- a guide of greater profit*, **1972**.
- PERALDI R. et CLEMENT A., *Digital processing of refraction data - study of first arrival*, Geophysical Prospecting, **20**, pp. 529-48, **1972**.
- GREEN R., *The seismic refraction method - a review*, Geoexploration, **12**, pp. 259-84, **1974**.
- MEYER R., *The continuous seismic refraction method*, Bull. Assoc. Eng. Geol., **15**, pp. 37-49, **1978**.
- MC QUILLIN, BACON M., BARCLAY W., *An introduction to seismic interpretation*, Gulf Publishing Company, Houston, **1979**.
- VIJAYA RAGHAVA M.S. et NANDA KUMAR G. , *The blind zone problem in multiple refraction-layer overburden situations*, Geophysical Prospecting, **27**, pp. 474-9, **1979**.
- PALMER D., *The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation*, K.B.S. Burke edition, SEG Tulsa, **1980**.
- CHAPEL P., *Géophysique Appliquée*, Dictionnaire et Plan d'Étude, Masson, **1980**.
- Reconnaissance géologique et géotechnique des tracés de routes et autoroutes*, ouvrage publié par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, **1982**.
- SCHMÖLLER R., *Some aspects of handling velocity inversion and hidden layer problems in seismic refraction work*, Geophysical Prospecting, **30**, pp. 735-51, **1982**.
- SJÖGREN Bengt, *Shallow Refraction Seismics*, Chapman and Hall, **1984**.
- FARREL R., EUWEMA R.N., *Refraction Statics*, Proceedings of IEEE, **72**, **10**, pp. 1316-1329, **1984**.
- PARASNIS D.S., *Principles of Applied Geophysics*, Fourth Edition, Chapman and Hall, **1986**.
- PALMER D., *Refraction seismics*, Geophysical Press, **13**, **1986**.
- LAVERGNE M., *Méthodes sismiques*, Editions Technip et Institut Français du Pétrole, **1986**.
- TELFORD W.M., GELDART L.P., SHERIFF R.E., *Applied Geophysics*, Second Edition, Cambridge University Press, **1990**.
- CLAY C.S., *Elementary exploration seismology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., **1990**.
- LANDA E., KEYDAR S., KRAVTSOV A., *Determination of a shallow velocity-depth model from seismic refraction data by coherency inversion*, Geophysical Prospecting, **43**, pp. 77-191, **1995**.
- RÜHL T., *Determination of shallow refractor properties by 3D-CMP refraction seismic techniques*, First Break, **13**, **2**, pp. 69-77, **1995**.
- MARI J.L., ARENS G., CHAPPELLIER D., GAUDIANI P., *Géophysique de Gisement et de Génie Civil*, Éditions Technip, **1998**.

Annexes



ANNEXE 1 - Bloc sismique	71
ANNEXE 2 - Mesures <i>in situ</i> des paramètres dynamiques du sol	74
ANNEXE 3 - La sismique aquatique	77
ANNEXE 4 - Compléments sur l'interprétation des dispositifs sismiques	81

ANNEXE 1

BLOC SISMIQUE

Introduction

Cette annexe a pour objectif de faire connaître les possibilités du procédé d'étude par bloc sismique appelé SISMOBLOC-CPGF[®] développé par la Compagnie de Prospection Géophysique Française dans les années 1970.

L'objectif était d'obtenir au moindre coût le maximum d'informations sur une zone à étudier, cela en exploitant les possibilités de la sismique réfraction sur la base d'une prospection tridimensionnelle.

Cette méthode est une généralisation de la méthode des tirs en éventail avec multiplication des tirs hors du champ des capteurs et interprétation automatique des résultats. Il est particulièrement recommandé de l'utiliser lorsque plusieurs dispositifs conventionnels proches les uns des autres sont implantés sur des sites où le rendement des tirs en ligne s'avère aléatoire. En particulier, dans les pays chauds à forte altération latéritique sablo-argileuse, les tirs « offset » d'un dispositif de 120 ou 240 m nécessitent dans une telle formation des charges de l'ordre de 10 à 20 kg de dynamite, quelquefois plus. En revanche, le rocher affleurant dans les fonds des cours d'eau, on choisit d'y effectuer des tirs partout où cela est possible avec un rendement excellent moyennant des charges très faibles de 100 ou 200 g d'explosifs. Ces tirs n'étant pas dans l'alignement des capteurs, on met en œuvre les interprétations automatiques du SISMOBLOC-CPGF[®], ou une interprétation basée sur les mêmes principes.

Mise en œuvre

La mise en œuvre consiste à implanter plusieurs capteurs régulièrement (ou irrégulièrement) espacés suivant deux directions perpendiculaires, et à réaliser deux tirs O et P situés nettement à l'extérieur de la zone d'implantation des capteurs et qui jouent un rôle comparable à celui des tirs « offset » des dispositifs conventionnels.

Les interprétations du SISMOBLOC sont considérablement valorisées par l'exécution de quelques tirs à l'intérieur de la surface à reconnaître.

Les données suivantes doivent être acquises (Fig. 48) :

- Coordonnées des points de tirs (x_0, y_0, z_0) (x_p, y_p, z_p) .
- Coordonnées de tous les capteurs (x_i, y_i, z_i) .
- Temps de parcours entre les points de tir O et P.
- Délais en O et en P.
- Temps de première arrivée aux capteurs à partir du tir O.
- Temps de première arrivée aux capteurs à partir du tir P.

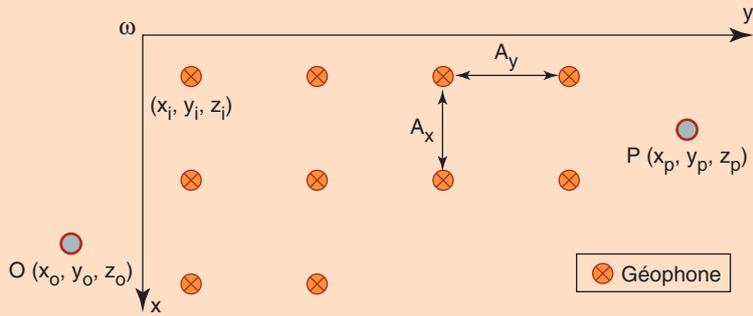
Les délais en O et P sont très peu différents des temps de remontée de l'onde sismique du substratum aux points O et P.



ANNEXE 1

FIGURE 48

MISE EN OEUVRE
« SISMOBLOC - CPGF ».



Interprétation

L'objectif de cette annexe n'étant pas de détailler le processus d'interprétation par ailleurs breveté, nous en traçons ici les grandes lignes.

Le rayon sismique allant du point de tir O (ou P) à un capteur M du bloc suit un chemin obtenu de la manière suivante (Fig. 49) :

- a - on trace une perpendiculaire des points O (ou P) à la surface du substratum, ω (ou π) étant le pied de cette normale,
- b - on fait la même chose à partir du point M, μ étant le pied de cette normale.

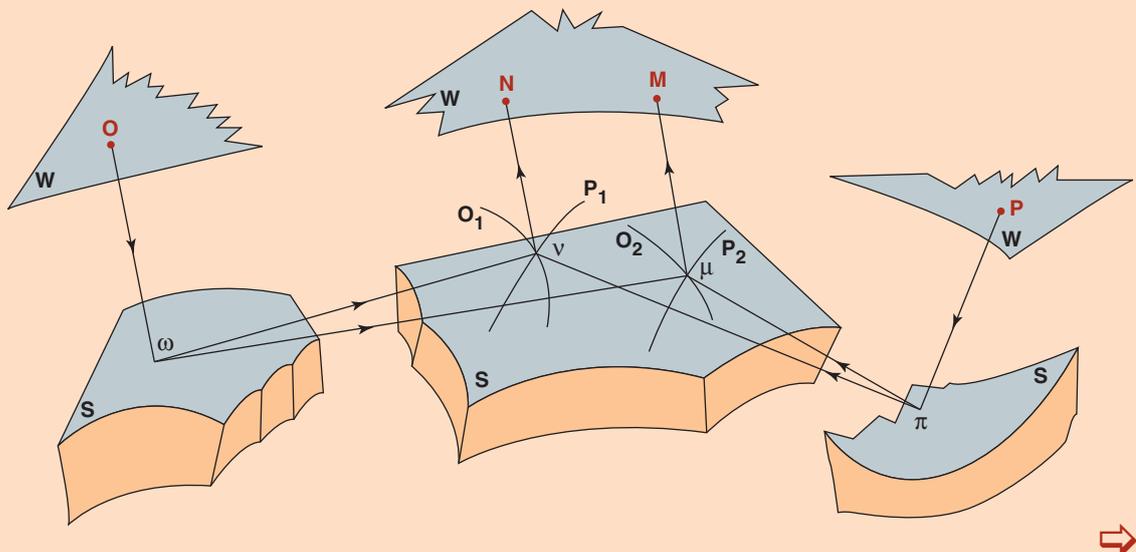
Dans une première approximation, on suppose que le chemin sismique entre le point de tir O (ou P) et le capteur M est le chemin $O\omega\mu M$ (ou $P\pi\mu M$).

L'exploitation des temps d'arrivée par un procédé d'interprétation dérivé de la méthode du « Plus-Minus » permet de calculer :

- la répartition des vitesses de fond,
- la valeur du délai au droit de chaque capteur,
- les vitesses de surface,
- la cote du substratum.

FIGURE 49

SCHEMA DE PRINCIPE « SISMOBLOC - CPGF ».



ANNEXE 1

Les données connues étant introduites et plusieurs hypothèses de vitesses intermédiaires étant données par l'utilisateur, le processus d'interprétation pourrait se résumer par les points suivants :

- 1 - Un premier calcul de la vitesse de fond est effectué en supposant que les distances entre les pieds de normale sont équivalentes aux distances entre les points du bloc situés en surface (i.e. $\omega\mu = OM$).
- 2 - À partir de cette estimation, il est possible de calculer les délais en tout point du bloc.
- 3 - La corrélation du résiduel sur la topographie avec le résiduel sur les délais permet d'en déduire une vitesse de surface.
- 4 - On examine ensuite une à une les hypothèses de l'utilisateur sur les vitesses intermédiaires.
- 5 - À chaque hypothèse de vitesse intermédiaire correspond un schéma du substratum (carte du toit du substratum), obtenu par le calcul des longueurs des normales à ce substratum.
- 6 - Il est alors possible, à partir de cette carte et des diverses hypothèses de vitesses intermédiaires de lancer une inversion dont le processus itératif se fait sur le cycle : calcul des vitesses de fond - calcul des délais - calcul des vitesses de surface - calcul de la cote du substratum.

Résultats

L'exploitation du SISMOBLOC-CPGF permet donc d'obtenir les cartes suivantes :

- Cartes des vitesses de fond, des vitesses de surface et des vitesses intermédiaires.
- Cartes des épaisseurs correspondantes.
- Carte des délais.
- Carte du toit du substratum.

ANNEXE 2

MESURES *IN SITU* DES PARAMÈTRES DYNAMIQUES DU SOL

Le principe de base de la théorie de l'élasticité infère que dans un solide homogène et isotrope les déformations sont proportionnelles aux déplacements lorsque ceux-ci tendent vers zéro. En sismique, les contraintes et les déformations sont très faibles, et les modules que l'on détermine par cette méthode sont assimilables aux modules élastiques. En cela ils sont très différents des modules statiques issus d'essais de laboratoire en mécanique des roches.

Les contraintes de cisaillement se propagent à une vitesse dite vitesse des ondes de cisaillement V_S (ou vitesse transversale), les contraintes de compression se transmettent à une vitesse dite vitesse des ondes de compression V_P (ou vitesse longitudinale).

La connaissance de la vitesse de déplacement de ces deux types d'ondes permet de calculer les modules dynamiques des sols par les formules suivantes :

$$\text{Coefficient de Poisson : } \nu = (V_P^2 - 2V_S^2)/2.(V_P^2 - V_S^2)$$

$$\text{Module d'Young : } E = 2\rho \cdot V_S^2 \cdot (1 + \nu)$$

$$\text{Module de cisaillement : } G = \rho \cdot V_S^2$$

où ρ est la masse volumique.

Il importe pour déterminer ces modules de créer ces deux types d'ondes par application de contraintes qui privilégient l'un ou l'autre type d'onde, ce qui confère une importance fondamentale à la nature de la source de l'ébranlement.

Avant d'aborder la mise en œuvre, rappelons qu'à toute surface de discontinuité, une onde propre (purement longitudinale, ou purement transversale) se réfracte en créant une onde longitudinale et une onde transversale qui se propagent ensuite suivant leur propre mode.

Cette propriété implique que les essais doivent être réalisés sur des bases très courtes, *au sein d'un solide supposé alors homogène et isotrope*, ce qui permet par ailleurs de privilégier le mode de création de l'ébranlement au détriment de l'énergie transmise.

Mise en œuvre

On distingue deux types d'essais : les essais de surface et les mesures entre deux forages.

□ Mesures à partir de la surface

a - Dispositifs conventionnels

Le dispositif d'acquisition mis en place est très proche d'un dispositif classique de sismique réfraction, la seule différence est liée à l'utilisation de capteurs tridirectionnels permettant d'analyser plus facilement les trois signaux ; selon l'angle d'attaque de l'ébranlement par rapport à l'orientation des bobines de l'unité tridirectionnelle, l'un des capteurs réagira préférentiellement, soit à l'effort de cisaillement, soit à l'effort de compression.

On conseillera aussi d'utiliser une source classique type explosif ou chute de poids pour générer préférentiellement des ondes de compression (ondes P), et une source permettant de cisailier le terrain pour les ondes S.

La source S la plus simple, et souvent la plus efficace, consiste à placer horizontalement un madrier sous les roues d'un véhicule afin d'assurer un couplage optimal avec le sol. On utilise



ANNEXE 2

généralement ce dispositif pour générer un cisaillement horizontal en frappant latéralement sur un bord vertical du madrier.

Pointé de l'onde de cisaillement et valeurs de V_S

Pour donner un ordre de grandeur, on peut admettre en première approximation que les rapports V_p/V_s varient de 1,6 à 3 environ lorsque V_p passe de 6000 m/s à 800 m/s, ce qui correspond à des coefficients de Poisson variant de 0,18 à 0,4 environ.

Il convient cependant de ne pas rejeter *a priori* certaines valeurs qui pourraient paraître anormales. On citera en particulier la valeur de $\nu = 0,1$ pour les formations finement litées.

À l'autre extrémité de l'échelle, on trouve des valeurs de 0,42 à 0,48 (se rapprochant de la limite théorique de 0,50) pour certains terrains très peu consistants : tourbes, argiles molles.

Lorsque l'énergie portée par les signaux est suffisante, le pointé de l'onde de cisaillement est assez aisé quand le point d'émission est loin du point de réception car les deux trains d'ondes ont le temps de se séparer et apparaissent bien individualisés. Le problème est un peu plus complexe quand les distances sont courtes car l'onde transversale qui est la plus tardive est encore mêlée à la vibration longitudinale.

On conseillera pour optimiser le pointé de mettre en œuvre une source permettant :

- de privilégier les efforts de cisaillement afin d'avoir une amplitude en S la plus énergétique possible,
- d'utiliser le principe de polarisation de l'onde S selon lequel le signal s'inverse quand on inverse le sens de frappe. L'onde de compression n'étant pas soumise à l'inversion, la superposition des signaux permet de pointer le départ de l'onde S au moment où commence le phénomène d'inversion (opposition de phase).

b - Certaines nouvelles méthodes basées sur l'analyse de la courbe de dispersion des ondes de surface permettent de remonter aux propriétés mécaniques du sol. Elles sont très spécialisées et nécessitent des développements théoriques très longs qui sortent du cadre de cette brochure. Il importait de les signaler.

☐ Mesures à partir des forages

Elles concernent toute la série d'essais dits cross-hole et down-hole qui seront traités par ailleurs. Elles présentent l'avantage de pouvoir reconnaître très aisément les différents types d'ondes, et en raison de leur application à de très courtes bases, d'éviter de prendre en considération des signaux altérés par des réfractions indiscernables. Leur inconvénient majeur est économique : la nécessité de réaliser et d'équiper les forages d'expérimentation.

Valeurs des modules dynamiques (tirés de l'ouvrage « Génie parasismique » édité par V. Davidovici, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris 1984).

Les modules de compression mesurés se classent par ordre croissant suivant la dureté des terrains :

- | | |
|--|----------------------|
| ➤ Terrains cristallins sains : | 50 000 à 100 000 MPa |
| ➤ Terrains cristallins fracturés : | 15 000 à 30 000 Mpa |
| ➤ Calcaires tendres, craies : | 5 000 à 10 000 Mpa |
| ➤ Terrains rocheux altérés : | 1 000 à 5 000 Mpa |
| ➤ Sables et graviers, remblais rocheux : | 500 à 1 500 Mpa |
| ➤ Argiles : | 100 à 500 Mpa |
| ➤ Argiles très molles, vases : | 10 à 100 MPa |

Dans le calcul des modules, le poids de la vitesse de cisaillement est prédominant.

Le module de cisaillement est indépendant de V_p .



ANNEXE 2

Le module d'Young n'est que très peu influencé par V_p , ce qui explique qu'une formation superficielle sous nappe a un module d'Young très peu différent de sa valeur hors nappe, alors que la vitesse V_p varie considérablement. Par exemple, on peut calculer qu'un remblai rocheux ayant hors nappe une vitesse sismique longitudinale de 800 m/s, verra, sous nappe, cette même vitesse se situer vers 2000 m/s. La vitesse de cisaillement et le module de cisaillement ne seront pas modifiés et le module d'Young ne passera que de 800 à 900 MPa.

Comparaison des valeurs des modules dynamiques et statiques

Les modules obtenus par mesures sismiques sont appelés modules dynamiques par opposition aux modules dit statiques, calculés à partir des courbes effort-déformation obtenues soit en laboratoire, soit *in situ* au vérin. Le module statique est toujours inférieur au module dynamique et le rapport E_d/E_s varie beaucoup. Cela est lié aux vitesses de déformation mises en jeu lors des essais sismiques qui sont de l'ordre du cm/s ou du mm/s, ce qui correspond à des déplacements de l'ordre du micron. Il s'agit donc de déformations extraordinairement faibles et non comparables à celles qu'on fait subir au terrain lors d'essais statiques. Les valeurs des modules dynamiques et statiques peuvent différer assez considérablement jusqu'à se situer dans un rapport de 10.

ANNEXE 3

LA SISMIQUE AQUATIQUE

Cette annexe a pour objectif de rappeler les particularités de la sismique réfraction mise en œuvre en milieu fluvial ou marin.

A. Matériel

Seule la partie immergée du matériel diffère du matériel utilisé en zone terrestre.

Les deux principales sources utilisées sont le Sparker (étinceleur) et le canon à air, l'explosif étant de plus en plus rarement autorisé compte tenu des dégâts qu'il peut occasionner à la faune marine.

Sparker

Cette source fonctionne sur le principe de la création d'une ou plusieurs bulles d'air à partir d'une décharge électrique effectuée entre deux électrodes (phénomène de vaporisation de l'eau). La puissance et la fréquence du signal émis vont dépendre du nombre et de la taille des brins utilisés, et de l'intensité de la décharge électrique.

Canon à air

Cette source fonctionne sur le principe de l'expulsion à très grande vitesse d'un volume d'air comprimé. La puissance et la fréquence du signal émis vont dépendre du volume de la chambre (20 à 100 cubic inch) et de la pression de fonctionnement (40 à 140 bars) (Fig. 50 et 51).

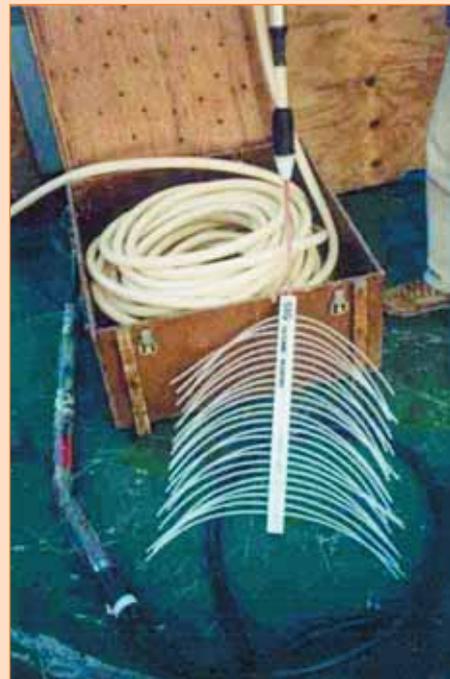
FIGURE 50

CANON À AIR (PHOTO FUGRO FRANCE).



FIGURE 51

SOURCE SPARKER 100 JOULES (PHOTO FUGRO FRANCE).



Les capteurs utilisés sont des hydrophones fonctionnant à partir d'un capteur de pression.

On conseillera pour les applications de sismique réfraction où le dispositif est le plus souvent posé, voire traîné sur le fond, d'utiliser des hydrophones avec transformateur intégré entièrement moulé.

On évitera, pour des raisons de fragilité, d'utiliser des hydrophones nécessitant l'utilisation de préamplificateurs avec alimentation en +/- 15 V intégrés dans une flûte à bain d'huile.

Comme pour la terrestre, on conseillera pour des profils de 120 à 240 m de long, d'utiliser des hydrophones dont la fréquence propre sera comprise entre 8 et 14 Hz.

B. Mise en oeuvre

La sismique réfraction en milieu aquatique peut se mettre en œuvre de manière statique : méthode de la « flûte coulée », ou de manière dynamique : méthode de la « flûte traînée ».

Flûte coulée

Les mesures en flûte coulée sont l'équivalent en marine des dispositifs sismique réfraction 5 tirs classiquement utilisés à terre, et faisant appel à la méthode d'interprétation du Plus-Minus.

Le principe de mise en œuvre est similaire à la sismique réfraction terrestre, il consiste à poser sur le fond une flûte d'hydrophones à l'aide de lests (corps morts), et à effectuer 2 tirs en bout, 1 tir au centre, et 2 en offset de part et d'autre du dispositif.

Flûte traînée

Dans le cas d'études effectuées sur des linéaires de plusieurs kilomètres, il peut être intéressant de mettre en œuvre un système où l'ensemble source et capteurs sont directement traînés sur le fond.

La source est généralement montée sur un traîneau à l'arrière duquel est attachée la flûte d'hydrophones.

Ce système autorise une grande précision dans la définition de l'offset source récepteur, ainsi que dans la définition de l'intertrace entre capteurs. Il permet aussi de s'assurer de l'alignement du dispositif.

Cette méthode est par contre basée sur la réalisation d'un seul tir par dispositif, ce qui limite son utilisation à des contextes dans lesquels l'objectif ne présente pas trop de variation de faciès et/ou d'évolution rapide de la profondeur du toit du substratum.

Positionnement

Le positionnement se fait généralement à l'aide d'un système GPS différentiel permettant de localiser le support naval avec une précision métrique par rapport à une base fixe située à terre.

Ces données peuvent être transmises à un ordinateur embarqué et utilisées par un programme de navigation indiquant la route du navire et l'écart par rapport au profil théorique.

Recommandation

La principale recommandation concernant la mise en œuvre est liée au choix de la longueur du dispositif qui pourra être dans certains cas de dix à quinze fois la profondeur d'investigation souhaitée, cela compte tenu des faibles contrastes de vitesses généralement observés dans les fonds marins.



ANNEXE 3

Le tableau présenté ci-dessous donne différents calculs de distances critiques en fonction du contraste de vitesses entre les couches.

H1 (m)	V1 (m/s)	H2 (m)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	Xc1 (m)	Xc2 (m)
5	1500	5	1600	1700	55,7	79,7
5	1500	5	1700	1800	40	75,9
5	1500	5	1700	1900	40	57,8
5	1500	5	1800	1900	33,2	74,7
5	1500	5	1800	2000	33,2	56,6
5	1500	5	2000	2500	26,5	39,2

H1 : épaisseur première couche

V1 : vitesse première couche

H2 : épaisseur deuxième couche

V2 : vitesse deuxième couche

V3 : vitesse troisième couche

Xc1 : distance critique pour voir apparaître la vitesse V2 sur la dromochronique

Xc2 : distance critique pour voir apparaître la vitesse V3 sur la dromochronique

On notera par exemple que la distance critique est de 55,7 m pour une épaisseur H1 de 5 m dans le cas d'un contraste de vitesse de 100 m/s entre V_1 et V_2 .

C. Interprétation

On conseillera vivement de demander systématiquement un calage par sondage mécanique ou CPT avant validation des hypothèses d'interprétation.

En effet, un des risques d'erreurs rencontré en interprétation en milieu aquatique est lié au fait que la première arrivée enregistrée sur les capteurs donnera toujours au minimum une vitesse de 1 500 m/s correspondant à la vitesse de déplacement de l'onde sismique dans l'eau.

Toute présence d'un horizon présentant des vitesses inférieures à 1500 m/s sera fortement masquée par l'arrivée de cette onde directe particulièrement énergétique et haute fréquence.

Dans certains cas exceptionnels, il est possible d'aller chercher derrière l'arrivée haute fréquence correspondant à l'arrivée directe par l'eau, une arrivée basse fréquence plus tardive correspondant à une vitesse inférieure.

Les exemples dans lesquels un géophysicien expérimenté a pu aller identifier ces arrivées tardives sont assez rares, on pourra citer une publication de la CPGF sur une étude sismique réfraction marine effectuée au Cap d'Agde en milieu côtier vaseux.

Des fonds marins présentant des vitesses inférieures à 1 500 m/s peuvent s'observer dans certains cas particuliers quand les sédiments présentent une faible teneur en gaz. On sera donc particulièrement prudent dans les zones de marnage, ainsi que dans les secteurs de sédiments plus ou moins organiques risquant de présenter une teneur même faible en gaz de décomposition.

L'exemple de reconnaissance en milieu lacustre présenté dans le chapitre IV de ce livre est une très bonne illustration de ce risque.



D. Conditions d'utilisation

Contrairement à la sismique réflexion permettant une profondeur d'investigation de plusieurs centaines de mètres, la sismique réfraction ne pourra que très difficilement dépasser les cinquante premiers mètres, voire les cent premiers mètres dans des contextes géologiques bien particuliers.

Elle peut par contre être mise en œuvre par très faible profondeur d'eau (quelques mètres), alors que la sismique réflexion sera très fortement perturbée par la présence des réflexions multiples entre le fond et la surface.

On privilégiera la sismique réfraction dans les projets où la caractérisation directe des vitesses sismiques est un paramètre primordial pour le déroulement des travaux (dragage, ancrage d'ouvrages d'art, etc.), sachant que la sismique réflexion monotrace sera bien adaptée aux études structurales mais ne permettra pas de remonter aux vitesses.

Seule la réalisation d'une étude sismique réflexion multitrace permettra de remonter aux vitesses, et cela après un traitement du signal assez poussé.

ANNEXE 4

COMPLÉMENTS SUR L'INTERPRÉTATION DES DISPOSITIFS SISMIQUES

1. INTERPRÉTATION DE LA COURBE « MINUS »

1.1. Variation de la vitesse de fond

Lorsque le substratum est formé de plusieurs panneaux ayant des vitesses différentes, ces diverses vitesses apparaissent sur la courbe « Minus », comme le montre la figure 52. Cette propriété évidente du « Minus » découle directement de sa définition. Signalons encore que dans ce cas la vitesse lue sur la courbe « Minus » est valable au cosinus de l'angle de pendage près (valeur assimilable à 1 dans le cas général).

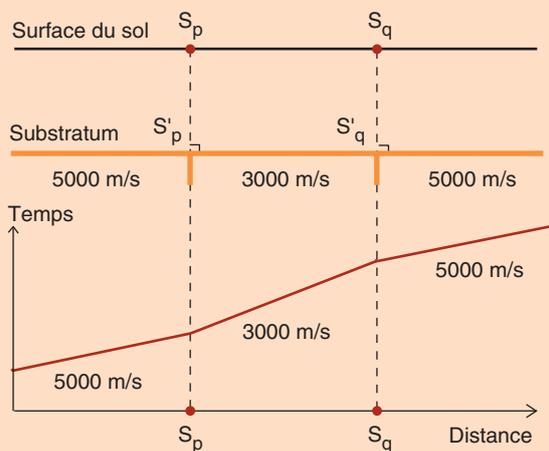


FIGURE 52

COURBE DE « MINUS » POUR UN SUBSTRATUM FORMÉ DE PANNEAUX AYANT DES VITESSES DIFFÉRENTES.

Lorsqu'apparaît sur la courbe « Minus » une anomalie franche on peut, en première analyse, supposer qu'on est en présence d'un compartiment du substratum ayant une vitesse différente de la vitesse moyenne qui apparaît par ailleurs. On verra dans le paragraphe suivant que certaines formes d'un substratum homogène peuvent donner des « Minus » proches de ceux donnés par un compartiment apparaissant dans un substratum plan. On reviendra sur ce point pour montrer comment différencier au mieux ces deux phénomènes.

1.2. Traduction sur la courbe « Minus » des formes élémentaires du substratum

Les deux formes élémentaires qui doivent être étudiées sont celles dites du « fond de bateau » et celle du « dos d'âne ».

Les deux exemples suivants expliquent le mécanisme d'apparition de vitesses différentes de la vitesse vraie du substratum, au milieu de la structure (Fig. 53). Cependant, les formes théoriques que nous indiquons ne sont pas rigoureusement exactes. Elles seront précisées et explicitées au paragraphe 1.3. *Cas général - Forme quelconque* de cette annexe.



ANNEXE 4

FIGURE 53

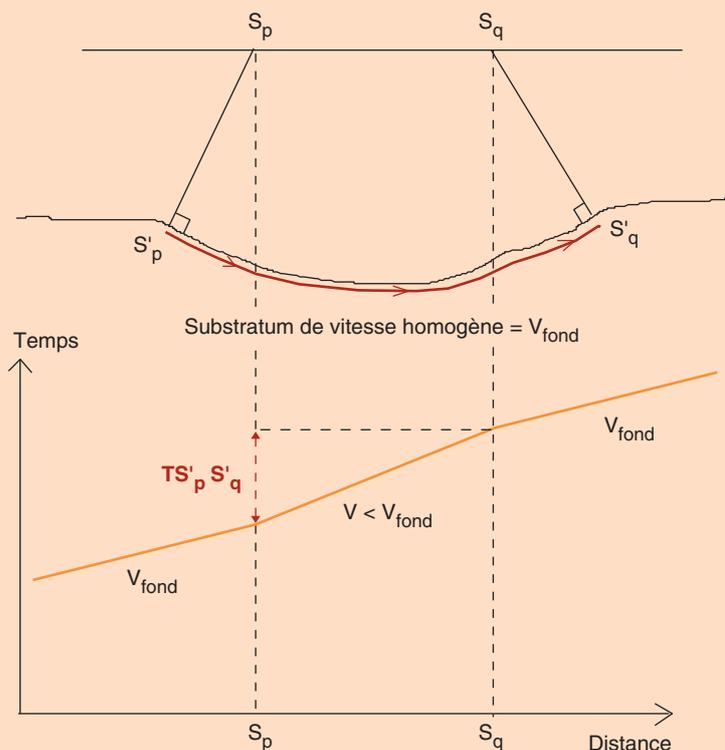
FORMES ÉLÉMENTAIRES.

*Forme en « fond de bateau » ou thalweg du substratum*

La distance $S_p S_q$ est, en raison de l'inclinaison des normales au substratum et de la profondeur de celui-ci, très nettement différente de la distance de trajet effectif $S'_p S'_q$ de l'onde sismique au toit du substratum. Or, le temps pris en compte dans la construction « Minus » est le temps réel du trajet $t(S'_p S'_q)$ qui est par construction affecté à la distance $S_p S_q$ qui peut être très nettement plus petite que la distance $S'_p S'_q$. L'anomalie qui apparaît alors sur la courbe « Minus » est une anomalie de vitesse artificiellement faible (Fig. 54).

FIGURE 54

COURBE DU « MINUS »
DANS LE CAS D'UNE FORME
EN « FOND DE BATEAU ».

*Forme en « dos d'âne »*

On fait le même raisonnement que pour la forme en fond de bateau.

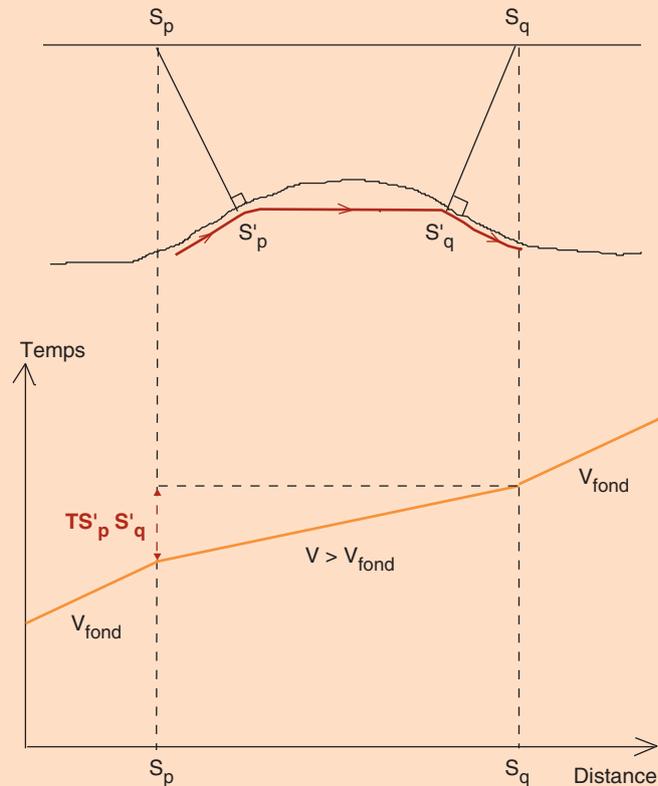
La distance $S_p S_q$ est, en raison de l'inclinaison des normales au substratum et de la profondeur de celui-ci, très nettement différente de la distance de trajet effectif $S'_p S'_q$ de l'onde sismique au toit du substratum. Or, le temps pris en compte dans la construction « Minus » est le temps réel du trajet $t(S'_p S'_q)$ qui est, par construction, affecté à la distance $S_p S_q$ qui peut être très nettement plus grande que la distance $S'_p S'_q$. L'anomalie qui apparaît alors sur la courbe Minus est une anomalie de vitesse artificiellement forte (Fig. 55).



ANNEXE 4

FIGURE 55

COURBE DE « MINUS »
DANS LE CAS D'UNE FORME DU
SUBSTRATUM EN « DOS D'ÂNE ».



1.3. Cas général - Forme quelconque

Le cas général peut être étudié sur une des formes élémentaires ci-dessus évoquées. Prenons par exemple le thalweg du substratum.

La zone S'_1 - S'_2 du fond se comporte par rapport à un fond plan (fond « 1 ») comme un dos d'âne, de même que la partie S'_3 - S'_4 du substratum par rapport à un fond plan (fond « 3 »). Ces deux anomalies entourent le thalweg du substratum en anomalie principale par rapport à un fond plan (fond « 2 »). La traduction sur la courbe « Minus » apparaît alors comme indiqué sur le graphique « temps-distance » : le thalweg est indiqué par une vitesse apparente faible entouré par deux zones montrant des vitesses apparentes fortes (Fig. 56).

Dans le cas d'un bombement du substratum un raisonnement identique conduit à un résultat symétrique comme le montre la figure 57.



ANNEXE 4

FIGURE 56

CAS GÉNÉRAL - FORME EN THALWEG.

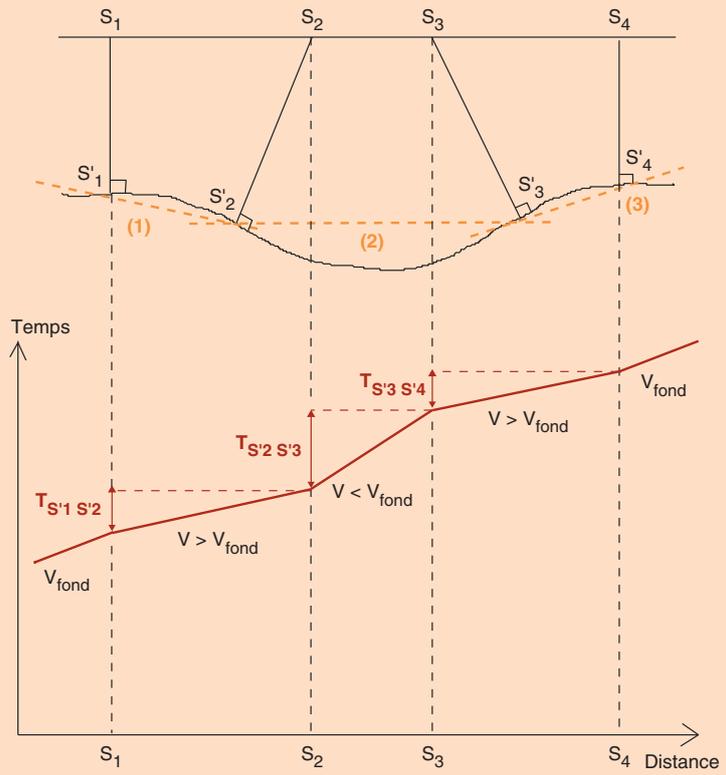
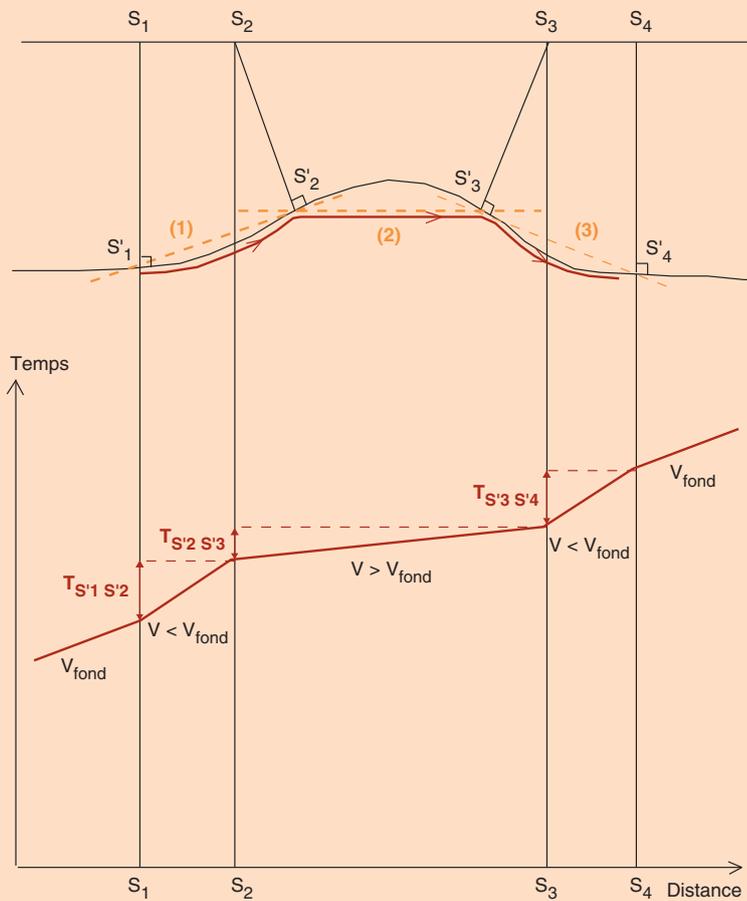


FIGURE 57

CAS GÉNÉRAL - BOMBEMENT DU SUBSTRATUM.



ANNEXE 4

1.4. Interprétation générale

La fonction « Minus » est le temps de trajet de l'onde sismique sur le réflecteur de fond. C'est ce principe qui doit guider toute interprétation des formes de la courbe « Minus ».

Une interprétation quantitative des formes de cette courbe nous semble devoir se limiter à une détermination de la vitesse moyenne du substratum considéré ou à la détermination des vitesses de divers compartiments du substratum. Toutes les interprétations, tentant à partir du « Minus » de déterminer des profondeurs, procèdent d'une opération de l'ordre de l'intégration. Les variations de la fonction « Minus » sont en effet comparables à des « infiniment petits », à partir desquels on demanderait de fournir des variations de profondeur pouvant être du même ordre de grandeur que celui de la profondeur du substratum. Une telle opération effectuée à partir de données expérimentales, donc relativement imprécises, serait très discutable.

L'attitude la plus constructive nous semble devoir être la suivante :

a - Lorsque des points de tir se situent au droit de l'anomalie « Minus », le calcul des profondeurs permet d'interpréter quantitativement l'anomalie du « Minus ». Cela n'est cependant possible que lorsque la forme correspondante est relativement étendue par rapport à la maille des points de tir. On est alors en présence d'informations qui se recourent en précisant la structure.

b - L'anomalie du minus ne se situe pas au droit d'un point de tir :

➤ Une anomalie de vitesse faible peut correspondre à un compartiment du substratum ayant effectivement une vitesse plus faible que la moyenne, les épontes de ce compartiment correspondant sensiblement aux limites de l'anomalie.

Une telle anomalie peut également correspondre à une dépression du substratum. Dans ce dernier cas, à chacune des frontières du tronçon de vitesse faible du « Minus », apparaît en général un petit secteur présentant une vitesse anormalement forte comme cela est indiqué au paragraphe 1.3. *Cas général - Forme quelconque* (anomalies par rapport aux fonds théoriques « 1 » et « 3 »).

➤ Une anomalie de vitesse forte est souvent plus facile à interpréter pour la raison suivante : s'il s'agit d'une forme en « dos d'âne » du substratum, il arrive que la vitesse apparente lue sur la courbe « Minus » soit supérieure aux vitesses sismiques qu'on peut raisonnablement attendre dans la nature, ces dernières ne dépassant pratiquement jamais 6 000 m/s. Une vitesse excessive est donc la preuve de l'existence d'une forme. Il peut se faire aussi qu'une anomalie de forte vitesse reste dans la gamme des vitesses de fond possible pour le faciès géologique concerné. Dans ce cas on peut faire le même type d'observation que pour la cas précédent, c'est-à-dire chercher, aux limites de l'anomalie de vitesse forte, un secteur de vitesse anormalement faible qui indiquerait alors une forme en dos d'âne.

2. COUCHES CACHÉES

Rappelons que la représentation « temps-distance » d'une branche de dromochronique est celle du temps d'arrivée de l'onde sismique la plus rapide, en fonction de la position sur le terrain de chaque point de réception. Cette première arrivée est celle, bien connue, du « break » d'un film sismique. Derrière ce « break », à des instants de plus en plus tardifs, arrivent des fronts d'onde ayant accompli des trajets au sein et aux frontières de toutes les unités géologiques qui composent cette structure. Le fait que, sur les branches de dromochroniques, les premières arrivées sont ainsi les seules mises en évidence conduit à ce que certains marqueurs n'apparaissent pas. Ces couches cachées sont, suivant leur nature, classées dans les deux catégories suivantes qui font l'objet des analyses ci-après :

- couche(s) ayant une vitesse plus faible que les deux couches encaissantes,
- couche(s) ayant une épaisseur relativement faible par rapport aux couches supérieures. ➡

2.1. Couche ayant une vitesse plus faible que les couches encaissantes

Par exemple on a : $V_1 < V_2 < V_4$, mais $V_3 < V_2$ et $V_3 < V_4$.

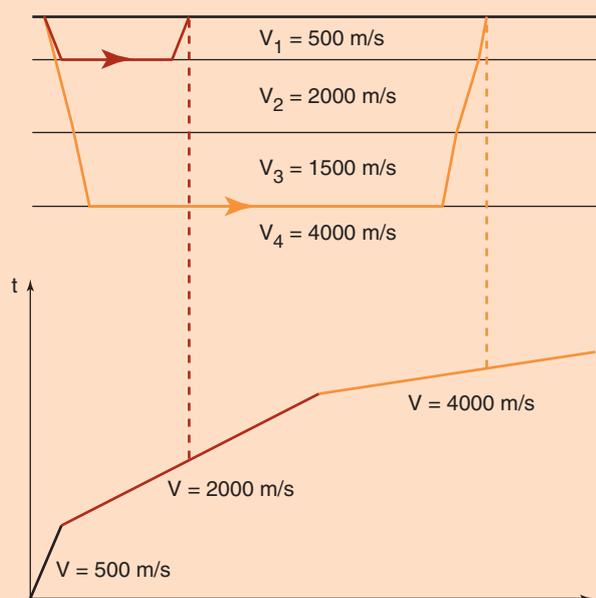
Les lois de la réfraction ne permettent pas une réfraction totale au sommet de la couche V_3 , et par conséquent cette couche n'apparaîtra jamais sur la dromochronique. On interprétera donc ce schéma comme un schéma à trois couches, V_1 , V_2 et V_4 . Le calcul classique conduira à donner une profondeur du réfracteur V_4 plus forte que la réalité. Dans un tel cas, le calcul exact des temps d'arrivée est possible, mais le problème inverse, qui est précisément celui de l'interprétation de la dromochronique ne peut donc donner qu'une solution entachée d'erreur. On en est réduit pour minimiser cette erreur à s'étalonner sur des structures connues ou à faire intervenir la géologie du site.

Parmi les situations les plus communément rencontrées où ce phénomène se présente, citons les deux suivantes :

- Dans les pays arides se forment des croûtes dures ayant des vitesses sismiques plus élevées que les terrains sous-jacents. C'est le cas en particulier des croûtes calcaires de certains pays méditerranéens, et des carapaces latéritiques des pays sahéliens. Assez souvent, l'énergie sismique transportée par ces couches superficielles est assez faible et s'amortit complètement à une certaine distance du point de tir, ce qui permet d'identifier la couche située sous cette croûte et, en négligeant la partie parasite du signal, l'interprétation classique n'est pas prise en défaut.
- Dans les séries sédimentaires existent des étages marneux au sein de formations calcaires plus rapides. La maîtrise de la géologie locale ou régionale permet en général d'attribuer à ces couches lentes une épaisseur connue et constante, et une vitesse probable (entre 1 500 et 2 000 m/s pour une marne) ce qui atténue considérablement les difficultés d'interprétation. Nous donnons ci après un exemple de dromochronique représentative de tels schémas géologiques. La figure 58 illustre le phénomène de couche cachée.

FIGURE 58

COUCHE CACHÉE AYANT UNE VITESSE PLUS FAIBLE.



ANNEXE 4

2.2. Couche ayant une faible épaisseur

2.2.1. Analyse du problème le plus simple

Considérons à titre d'exemple un schéma à quatre couches : $V_1 < V_2 < V_3 < V_4$.

Il peut se faire que le temps de trajet réfracté sur V_3 soit, dans la zone du point A, plus grand que ceux respectivement réfractés sur V_2 et V_4 .

Le pointage des premiers temps d'arrivée donnera une branche de dromochronique comportant trois segments de droite de pente $1/V_1$, $1/V_2$, et $1/V_4$.

Le segment de droite représentatif de la vitesse V_3 serait porté par la droite en tireté. Cette droite est telle que tout point traduisant un trajet réfracté sur V_2 ou sur V_4 correspond, dans la zone de l'intersection V_2/V_4 , à un temps inférieur à celui du trajet réfracté sur V_3 .

Dans le cas simple de quatre couches on a :

Temps réfracté sur V_2 : $t_2 = 2D1 + OS/V_2$.

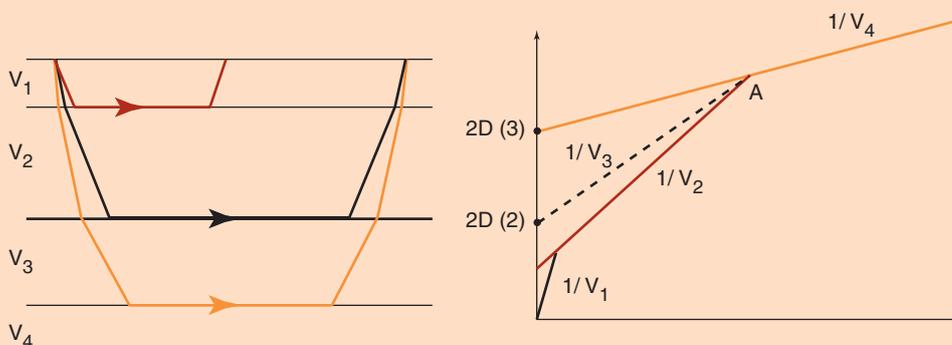
Temps réfracté sur V_4 : $t_4 = 2D3 + OS/V_4$.

OS étant la distance tir-sismographe.

Au point d'intersection A, si $t_3 = 2D2 + OA/V_3$ est supérieur à $t_4 = 2D3 + OA/V_4$, la droite représentative de V_3 n'apparaît pas sur la dromochronique, ce qui se traduit pour l'épaisseur e_3 par une condition d'inégalité, fonction de e_1 , e_2 , V_1 , V_2 , V_3 et V_4 (Fig. 59).

FIGURE 59

COUCHE CACHÉE AYANT UNE FAIBLE ÉPAISSEUR.



La courbe temps-distance est très explicite : on voit bien que le déplacement de la droite $t_3 = 2D2 + X/V_3$, au-dessus du point A correspond à une diminution de la différence $D3-D2$, quantité qui est, en première approximation, proportionnelle à e_3 .

L'épaisseur critique de e_3 pour laquelle cette épaisseur est maximale tout en restant non visible sur la branche de dromochronique, est celle qui correspond à la position de la droite V_3 passant par le point A.

L'expression exacte de la valeur critique e_{3C} de e_3 est, pour le schéma considéré à quatre couches, la suivante :

$$e_{3c} = [(D_2 - D_1) \frac{V_2(V_4 - V_3)}{V_4(V_3 - V_2)} + D_2 - \frac{e_1}{V_1} \cos i_{1,4} - \frac{e_2}{V_2} \cos i_{2,4}] \cdot \frac{V_3}{\cos i_{3,4}}$$



Cette formule s'obtient en calculant l'épaisseur e_3 pour laquelle $Xc_2 = Xc_3$.

Sachant que :

$$Xc_3 = (2D_3 - 2D_2) \cdot \frac{V_3 V_4}{V_4 - V_3}$$

$$Xc_2 = (2D_2 - 2D_1) \cdot \frac{V_2 V_3}{V_3 - V_2}$$

Pour fixer un ordre de grandeur, affectons à ce schéma à quatre couches les valeurs numériques suivantes :

$$e_1 = 2,9 \text{ m} \quad V_1 = 500 \text{ m/s},$$

$$e_2 = 10,9 \text{ m} \quad V_2 = 1000 \text{ m/s},$$

avec $V_3 = 2000 \text{ m/s}$ et $V_4 = 4000 \text{ m/s}$.

On obtient $e_{3c} = 8,7 \text{ m}$.

Cette épaisseur de 8,7 m est l'épaisseur critique de la troisième couche : si e_3 est inférieure à 8,70 m, le segment représentatif de la couche V_3 n'apparaît pas sur la dromochronique.

L'interprétation effectuée sans prendre en compte cette couche introduit alors deux types d'erreurs lors de l'interprétation classique :

- on prend en compte un faux schéma à trois couches : 500, 1000, 4 000 m/s, la couche à 2 000 m/s étant occultée.
- en plus de cette erreur stratigraphique, le fait de ne pas prendre en considération cette couche V_3 dans le calcul des profondeurs conduit à minorer la profondeur du toit du substratum. Dans le cas présent, si on ne tient pas compte de e_3 et si son épaisseur est égale à sa valeur critique de 8,70 m, l'erreur théorique sur la position du toit de V_4 est de l'ordre de 2 mètres.

Les difficultés rencontrées dans l'identification des vitesses cachées peuvent être contournées en tentant de relier le délai sismique avec une profondeur, et ce sur la base de forages d'étalonnages. Par exemple dans les contrées équatoriales, sur les sites d'altération sablo-argileuse du socle cristallin, on a observé que la profondeur du substratum (en m) s'obtenait en multipliant le délai sismique (en ms) par un facteur voisin de 0,55, alors que les vitesses visibles (280 m/s sur 5 800 m/s) impliqueraient un coefficient de l'ordre de 0,28, ce qui prouve que la loi de vitesse avec la profondeur met en jeu des vitesses cachées caractérisant la couverture, plus fortes que 280 m/s.

Note pratique

La réalisation de plusieurs dispositifs permet parfois de repérer la présence d'une couche cachée sur un ou quelques tirs quand son épaisseur devient supérieure à l'épaisseur critique à partir de laquelle elle redevient visible. Il est alors parfois conseillé de l'introduire dans l'hypothèse d'interprétation des dispositifs voisins, si l'on considère bien sûr que la géologie locale ne présente pas d'évolution rapide de faciès et de structure.

Si on se trouve dans un cas de ce type, il est recommandé, pour minimiser l'erreur, de construire la droite représentative de V_3 , en la faisant passer par le point A, comme indiqué sur la figure 59.

2.2.2. Généralisation

Toute vitesse intermédiaire qui n'apparaît pas sur une branche de dromochronique peut être introduite avec son épaisseur maximale, en faisant passer la droite représentative de cette vitesse au point A ou au-dessus du point A tel qu'il est défini sur la figure. On peut également



ANNEXE 4

envisager de faire passer dans cette zone, en plus de V_3 , une autre droite V'_3 telle que $V'_3 < V_4$ et $V'_3 > V_2$. Le degré de liberté n'est cependant pas total, et si toutes les vitesses intermédiaires peuvent être introduites, elles ne peuvent pas l'être en les faisant passer toutes par un point tel que A. (L'analyse de ce problème passe par celle du problème inverse qui consiste à introduire entre les couches V_2 et V_4 , toutes les vitesses intermédiaires comprises entre V_2 et V_4 suivant une loi continue, et d'en calculer la réponse).

Sur l'ensemble de la dromochronique (Fig. 60) et en chaque point tel que A, peuvent être introduites des vitesses intermédiaires, ainsi qu'il est indiqué sur le graphique ci-après.

Les couches visibles sur ce graphique ont, par exemple, des vitesses de 500, 1 000, 2 000 et 5 000 m/s.

On introduit sur cette branche de dromochronique les vitesses supplémentaires suivantes : 1 500 m/s entre les couches 1 000 et 2 000 m/s, avec une droite représentative passant par le point A_2 , ainsi que les vitesses 3 000 et 4 000 m/s entre les couches 2 000 et 5 000 m/s avec des droites représentatives passant toutes deux par le point A_3 .

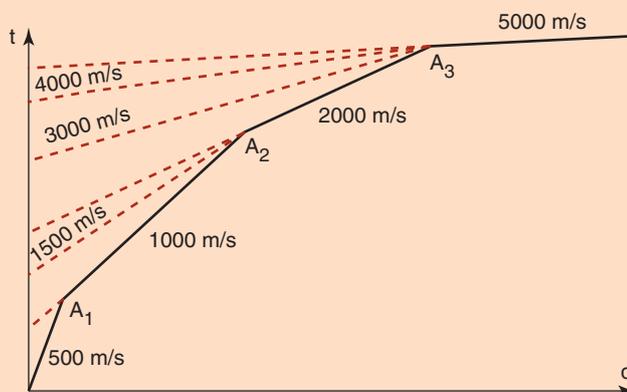


FIGURE 60
COUCHES CACHÉES -
GÉNÉRALISATION.

Le calcul des profondeurs donne les valeurs suivantes :

➤ Schéma à 4 couches : 500, 1 000, 2 000, 5 000 m/s

Profondeurs du toit des couches :

1 000 m/s : 2,9 m,

2 000 m/s : 22,4 m,

5 000 m/s : 59,8 m.

➤ Schéma à 7 couches : 500, 1 000, 1 500, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000 m/s

Profondeurs du toit des couches :

1 000 m/s : 2,9 m,

1 500 m/s : 17,5 m,

2 000 m/s : 26,9 m,

3 000 m/s : 48,4 m,

4 000 m/s : 63,9 m,

5 000 m/s : 76,5 m.

Si, effectivement, ces couches à 1 500, 3 000 et 4 000 m/s existent avec leur épaisseur maximale compatible avec les enregistrements, on fait, en n'en tenant pas compte, une erreur de près de 17 m sur la profondeur du toit du substratum à 5 000 m/s, soit 28 %.



ANNEXE 4

On est cependant pas encore au maximum de l'erreur possible. Le calcul de la profondeur maximale du substratum peut être fait, moyennant des développements théoriques qui vont au-delà de cet exposé, mais que nous nous devons d'aborder rapidement pour que l'interpréteur soit conscient de ce mécanisme, qui conduit de toute façon à minorer les profondeurs lorsqu'on se limite à l'interprétation brute des dromochroniques.

Supposons que dans la zone du point A, intersection des droites représentatives des couches de vitesses V_{p-1} et V_p , on fasse passer toutes les droites possibles correspondant à toutes les vitesses comprises entre V_{p-1} et V_p . Cela revient à dire qu'on suppose qu'il existe entre V_{p-1} et V_p une couche ayant une vitesse variant progressivement de V_{p-1} à V_p . Il reste à faire le choix de la nature de cette loi continue. On admet généralement que cette loi est une loi linéaire du type $V = aZ + V_0$.

Pour l'exemple ci-dessus, avec la succession des vitesses apparentes 500, 1000, 2000, 5000, le schéma (Fig. 61) réel serait :

FIGURE 61

COUCHES CACHÉES AVEC GRADIENT DE VITESSE.

500 m/s	Homogène
500 à 1000 m/s	Passage progressif de 500 à 1000 m/s
1000 m/s	Homogène
1000 à 2000 m/s	Passage progressif de 1000 à 2000 m/s
2000 m/s	Homogène
2000 à 5000 m/s	Passage progressif de 2000 à 5000 m/s
5000 m/s	Substratum

On peut faire le calcul des épaisseurs des couches dont les vitesses sont continues par un procédé automatique dont l'exposé va au-delà des objectifs de cet ouvrage.

Ce calcul des épaisseurs après introduction de ces couches supplémentaires $V_{1,2}$, $V_{2,3}$ et $V_{3,4}$ avec leur épaisseur maximum compatibles avec les dromochroniques conduit à :

- épaisseur du 500 m/s : 1,7 m,
- épaisseur de la couche de transition 500/1000 m/s : 2,3 m,
- épaisseur du 1000 m/s : 10,5 m,
- épaisseur de la couche de transition 1000/2000 m/s : 15,9 m,
- épaisseur de la couche de transition 2000/5000 m/s : 32,8 m.

Le toit du substratum se trouve alors rejeté à 79,7 m, ce qui correspond par rapport à l'interprétation brute à une majoration de plus de 33 %.

L'existence de couches non homogènes dont la vitesse croît avec la profondeur est un phénomène courant dans les terrains d'altération. Dans de tels cas, l'interpréteur devra admettre que les résultats d'une interprétation n'en tenant pas compte conduit, en première analyse, à des profondeurs de réflecteurs trop faibles. À défaut d'une réinterprétation des données tenant compte de cette particularité, l'apport des résultats des sondages d'étalonnage permet de recalculer les différents niveaux, en gardant cependant bien à l'esprit que dans un tel contexte l'ajustement doit se faire dans le sens d'une majoration des profondeurs.



ANNEXE 4

2.2.3. Conclusions

a - Les analyses ci-dessus montrent que l'interprétation brute ne tenant compte que des segments de droite visibles sur les graphiques « temps-distance » conduit à des résultats donnant une profondeur minorée du substratum.

Une première amélioration de l'interprétation consiste en se référant d'une part à la géologie du site, et d'autre part à des dispositifs exécutés sur le même site, à introduire au(x) coude(s) d'une dromochronique une droite représentative d'une couche existant très probablement.

Cette opération se justifie surtout lorsque les sondages mécaniques imposent un ajustement que l'interprétation classique ne peut satisfaire.

b - On peut calculer les profondeurs maxima compatibles avec les dromochroniques en introduisant aux coudes de la dromochronique, entre les vitesses V_{p-1} et V_p une loi de vitesse continue et croissante. Pratiquement, des applications numériques nous ont montré que la nature de cette loi qui fait passer du mur de V_{p-1} au toit de V_p de façon continue ne semble pas avoir une influence déterminante sur la valeur de ces profondeurs maximales. Les calculs qui sont évoqués ici ont été faits avec les deux lois suivantes :

➤ Loi linéaire : $V = V_0 + az$,

➤ Loi exponentielle : $V = V_0 \cdot e^{kz}$.

La recherche de la profondeur maximale d'un substratum à partir d'une dromochronique décomposée en segments de droite, ne peut se faire que par le calcul automatique itératif ci-avant mentionné. Il faut prendre en compte les vitesses représentées par ces segments de droite et les délais correspondants qu'on affecte à la succession de couples formés par la couche de vitesse homogène V_{p-1} et la couche formant une couche de transition continue entre V_{p-1} et V_p .

Ci-dessous nous indiquons, pour information, les équations paramétriques des dromochroniques obtenues dans un terrain où le gradient de profondeur est vertical et où la loi de croissance vitesse/profondeur est unique. Elle donne les valeurs $X(i_0)$ et $t(i_0)$ [distance d'émergence et temps correspondant], le paramètre i_0 étant l'angle d'incidence du rayon sismique lié au point d'émergence.

Loi linéaire :

$$X = 2V_0/\arctg(i_0),$$

$$t = -2/a \cdot \text{Ln}[\text{tg}(i_0/2)].$$

Loi exponentielle :

$$X = 2(\pi/2 - i_0)/k,$$

$$t = 2\cos(i_0)/kV_0.$$

Remarque: Les rayons sismiques obéissant à ces lois sont des courbes. Il est rarissime en sismique réfraction qu'on puisse détecter à coup sûr des courbes bien identifiées sur les graphiques temps/distance.

Document publié par le LCPC sous le numéro J1050385
Conception et réalisation : LCPC-IST, Marie-Christine Pautré
Dessins : LCPC-IST, Philippe Caquelard
Impression : Jouve - N°
Dépôt légal : 1er trimestre 2005

Le présent guide, rédigé à l'initiative de l'AGAP Qualité (Association pour la qualité en géophysique appliquée), est destiné aux maîtres d'œuvres et aux prestataires de service afin de les aider dans la préparation, l'organisation, la réalisation et l'interprétation de la sismique réfraction.

La rédaction de cet ouvrage s'appuie sur des praticiens bénéficiant d'une large expérience acquise sur de nombreux chantiers de reconnaissances appliquées au génie civil.

Il comprend deux parties :

La première partie aborde toutes les notions de base nécessaires pour acquérir les connaissances conduisant à une bonne mise en œuvre de la méthode sismique réfraction.

Après un bref rappel des notions fondamentales permettant de mieux appréhender les principes physiques sur lesquels repose cette méthode, l'accent a été mis sur les aspects pratiques de mise en œuvre de cette technique, avant d'aborder le problème de l'interprétation des données.

La seconde partie est composée de quatre annexes qui abordent des problèmes d'interprétation particuliers et des mises en œuvre spécifiques de la sismique réfraction (bloc sismique, sismique marine), ou utilisant certaines propriétés de la propagation des ondes sismiques (détermination des modules dynamiques).

This book, written under the patronage of the French Association for Quality in Applied Geophysics, is intended for professionals in geophysics involved in seismic refraction surveys.

Aim of this book is to assist geophysicist in preparation, organization, performance and interpretation of a seismic refraction survey.

The authors have gained a wide experience in geophysical investigations methods applied to Civil Engineering, with specialization in seismic refraction.

This book is divided in two parts:

The first one, after a brief introduction on basic principles , emphasizes practical aspects concerning field work and classical interpretation.

The second one is composed of four appendices containing information on marine surveys, 3-D applications, dynamic moduli calculation and more complex interpretational problems.