

La prospection sismique au service de l'ingénieur

Autor(en): **Jenny, Jacques / Burri, Jean-Paul**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **120 (1994)**

Heft 14

PDF erstellt am: **14.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78326>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

La prospection sismique au service de l'ingénieur

par Jacques Jenny
et Jean-Paul Burri,
Bureau Géologie-
Géophysique,
rte des Acacias 25,
1227 Genève

1. Résumé

La prospection géophysique par sismique réfraction, par réflexion et par tomographie peut considérablement améliorer la connaissance du *substratum* rocheux et de son recouvrement. Ces méthodes complètent l'information ponctuelle des forages par une vue bi-dimensionnelle indispensable pour suivre l'évolution latérale des couches géologiques profondes et connaître leurs caractéristiques mécaniques.

2. Introduction

Les méthodes sismiques font partie des prospections géophysiques et sont particulièrement bien adaptées pour résoudre les problèmes posés par le génie civil. En effet, leur prin-

cipe de base repose sur la vitesse de propagation d'ondes élastiques dite sismiques dans les roches, ce qui permet de connaître la position des terrains en profondeur ainsi que leurs caractéristiques mécaniques. Ces ondes se déplacent en surface ou le long des limites de couches (ondes de Raleigh et Love), ou encore à l'intérieur des corps rocheux (ondes de compression dites *P* et de cisaillement dites *S*).

La méthode consiste à provoquer des ondes de choc dans le sol et en analyser le temps de parcours, la vitesse et le trajet, qui obéissent aux lois de l'optique, la loi de Snell en particulier. On peut se baser sur les *ondes réfractées* qui sont les premières arrivées, les *ondes ré-*

fléchies ou encore le *trajet direct* des ondes en tomographie. Sur les enregistrements, on peut également distinguer les ondes propagées dans l'air (*Air wave*) et en surface du sol (*Ground roll*, fig. 1). La source d'énergie pour les ondes sismiques dépend de la profondeur d'investigation souhaitée et des contraintes environnementales: il peut s'agir d'impacts de marteau sur le sol, de tirs de cartouches de chasse dans le sol ou encore de l'explosion de charges placées à 1 ou 2 mètres de profondeur. Pour une profondeur d'investigation égale, la sismique réflexion nécessite moins d'énergie.

Pour détecter les ondes sismiques venant de la profondeur, on fixe sur le sol de nombreux

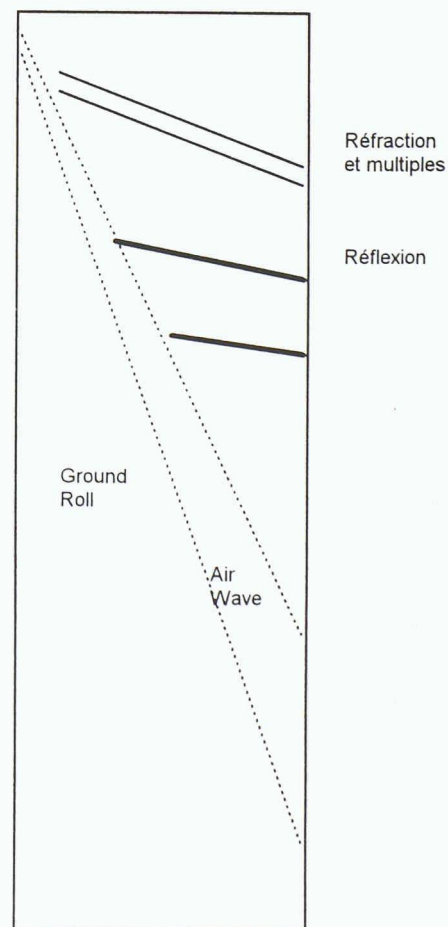
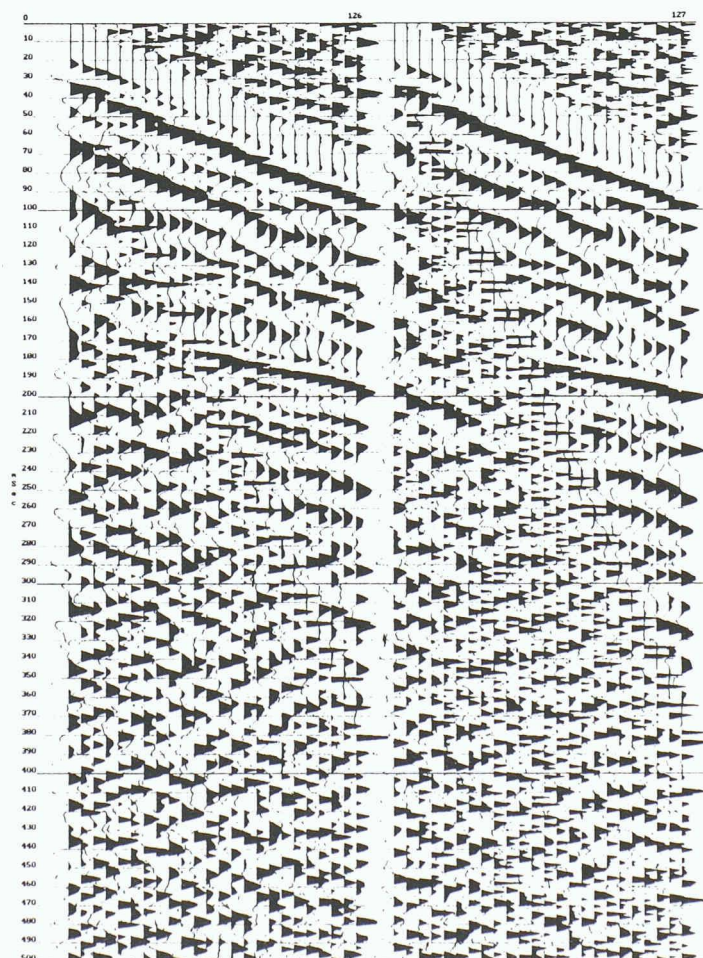


Fig. 1. - Exemple de films sismiques montrant les différents types d'ondes enregistrées (tir avec 200 g d'explosif enterré à -2 m)

géophones (12 à 48) qui sont reliés à un câble, appelé *flûte*, conduisant les signaux captés à un *enregistreur sismique* (fig. 2). Ce type d'appareil a profondément évolué ces dernières années, parallèlement aux progrès de l'informatique et les derniers modèles sont pilotés par un micro-ordinateur incorporé dans l'enregistreur. La sensibilité s'est accrue, il est possible de filtrer les signaux, d'enregistrer de longs temps d'écoute, d'additionner des tirs réalisés au même emplacement (afin d'atténuer les bruits parasites aléatoires et d'augmenter les signaux sismiques en phase). En même temps, les méthodes d'interprétation se sont perfectionnées et des logiciels très performants ont été développés.

3. Sismique réfraction

3.1 Principe de la méthode

Un dispositif classique comporte deux câbles ou flûtes de 60, 120, 180, 240 m ou plus, comprenant chacune 12 ou 24 géophones le plus souvent régulièrement espacés (5, 10, 15 ou 20 m). On effectue deux tirs en bout de ligne à une demi-distance de géophone, un tir au centre et deux *offsets* (tirs effectués à l'extérieur du dispositif) à une distance variant en fonction

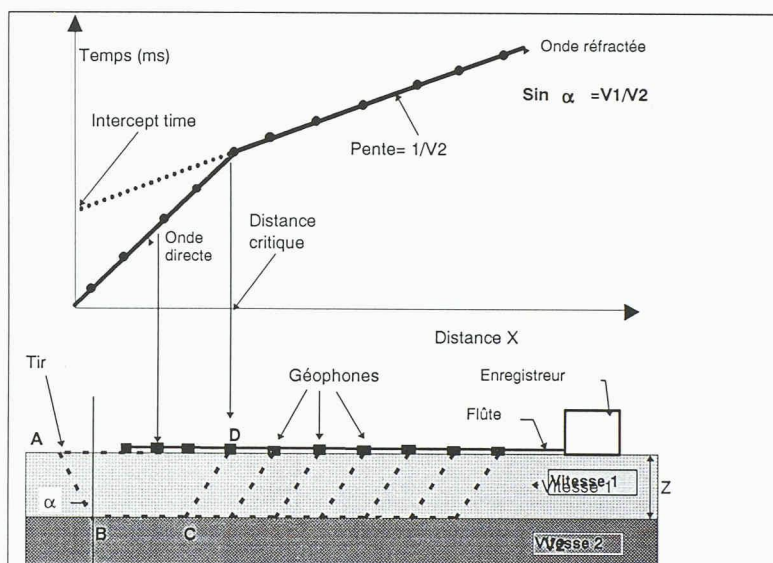


Fig. 2. – Schéma de propagation des ondes réfractées et de la dromochronique correspondante

de la profondeur du *substratum* et souvent égale à la moitié de la longueur des flûtes. Des tirs supplémentaires à l'intérieur du dispositif entre deux géophones améliorent considérablement la qualité de l'interprétation en permettant par exemple de calculer la profondeur sous tous les géophones, mais augmentent le temps d'acquisition sur le terrain et celui de l'interprétation. Dans des régions difficiles comme c'est généralement le cas dans les régions alpines, 7 à

11 tirs sont parfois nécessaires pour une bonne compréhension de la géométrie des couches.

La méthode de la sismique réfraction est basée sur la détection des premières ondes arrivées (ondes P ou ondes de compression). En dessinant un diagramme distance / temps de premières arrivées, dit *dromochronique* (fig. 2 et 3), on peut déterminer graphiquement la vitesse des différents terrains correspondant à l'inverse de la pente de la dromochronique.

La propagation des ondes dans le sous-sol est régie par les lois de l'optique, les angles de réfraction dépendant de la vitesse des terrains. Celles-ci connues, on peut calculer leur trajet, et en particulier l'épaisseur des différentes tranches de terrains de vitesse distincte [1]¹.

3.2 Exemple

L'étude d'une ancienne décharge est intéressante car, au moyen de la sismique réfraction, il a été possible de dessiner la topographie du rocher en profondeur. Le profil mesure 120 mètres de long et ses extrémités sont implantées sur des schistes altérés

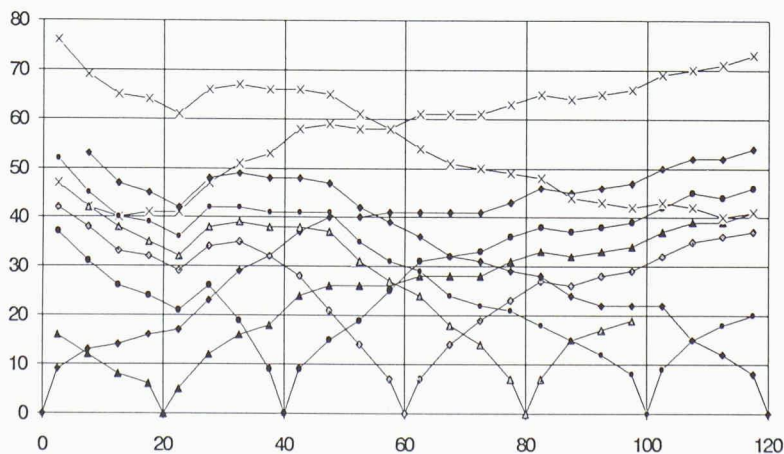


Fig. 3. – Exemple de dromochronique avec 9 tirs correspondant au profil ci-dessous

¹Voir bibliographie en fin d'article

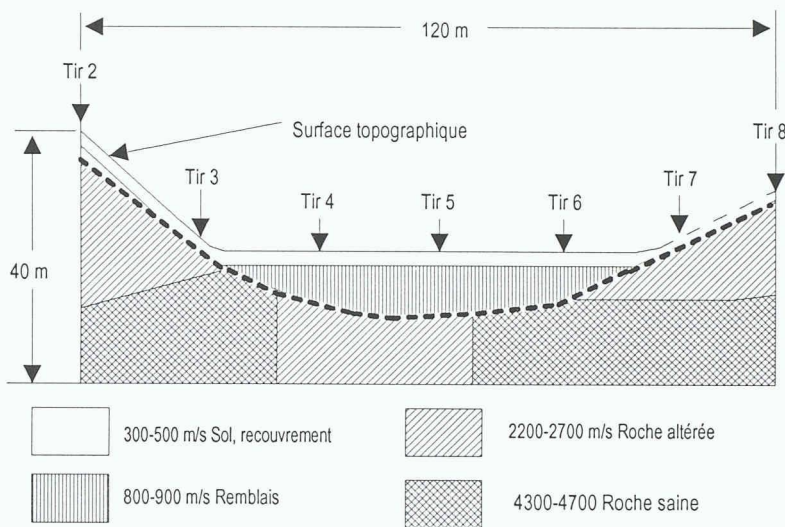


Fig. 4. - Exemple de profil sismique réfraction au travers d'une décharge

presque affleurants (fig. 4). Les vitesses de 300 à 400 m/s proviennent de la terre végétale ou des schistes très altérés. Dans l'axe de la vallée, le remplissage du vallon par des remblais argileux donne un terrain à 800 - 900 m/s. Le substratum rocheux est caractérisé par deux vitesses: l'une de plus de 4000 m/s prouve l'existence d'un rocher sain, compact, l'autre, d'environ 2000 m/s est le signe d'un matériel altéré ou broyé. Cette vitesse peut correspondre parfois à une moraine compacte, mais l'étude du contexte géologique, indissociable de toute étude géophysique, élimine formellement cette interprétation. Finalement, les trois profils réalisés dans le cadre de cette étude permettent de parfaitement localiser la décharge et montrent la présence d'une zone tectonisée dans l'axe de la vallée.

3.3 Avantages et limites de la méthode

L'usage de la sismique réfraction est très indiqué pour repérer des couches de vitesses contrastées, le *substratum* rocheux sous un recouvrement alluvionnaire par exemple. Le résultat est présenté sous la forme de profils sismiques présentant les variations spatiales des diverses tranches

de terrain. Les investigations sont possibles entre quelques mètres et plus de 100 mètres de profondeur. Dans le premier cas, l'usage du marteau suffit pour créer les ondes de chocs, dans le second, il faudra recourir à des explosifs. Cette méthode n'est inapplicable que dans de rares cas: couches plus rapides en surface, environnement très bruyant, ou dans une vallée très encaissée, car dans ce cas les ondes peuvent provenir des bords de la vallée avant que n'arrivent aux géophones les ondes réfractées en profondeur à l'aplomb du profil.

4. Sismique réflexion

4.1 Principe de la méthode

Les ondes sismiques sont réfléchies par chaque limite de terrains de vitesses différentes et l'énergie de la réflexion dépend du contraste de vitesses. Ce dernier est important entre le *substratum* rocheux et le recouvrement morainique ou alluvionnaire.

Chaque tir est effectué en bout de ligne à une certaine distance du premier géophone (*Offset*) dépendant de la profondeur d'investigation recherchée et de la vitesse des terrains superficiels, afin d'éviter que les bruits aériens (*Air wave*) et du sol (*Ground roll*) ne se superposent aux réflexions (fig. 1). Grâce à un commutateur multiple (*Roll along switch*), on déplace les géophones actifs branchés au préalable sur une série de flûtes, tout en conservant une distance constante entre le premier géophone et le tir.

Afin d'améliorer la qualité des réflexions, on « additionne » les traces qui ont un point réflecteur commun (*CDP* ou *Common depth point*, fig. 5). Cela présente également l'intérêt de diminuer l'importance des signaux aléatoires (bruits). Pour ramener toutes les traces à une trace commune perpendiculaire au CDP, il faut connaître les vitesses

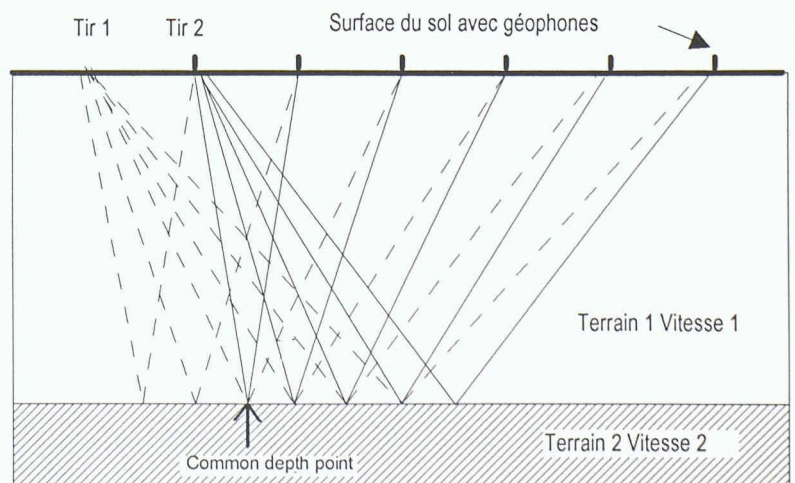


Fig. 5. - Schéma de la sismique réflexion selon la méthode de la couverture multiple (*Common depth point*)

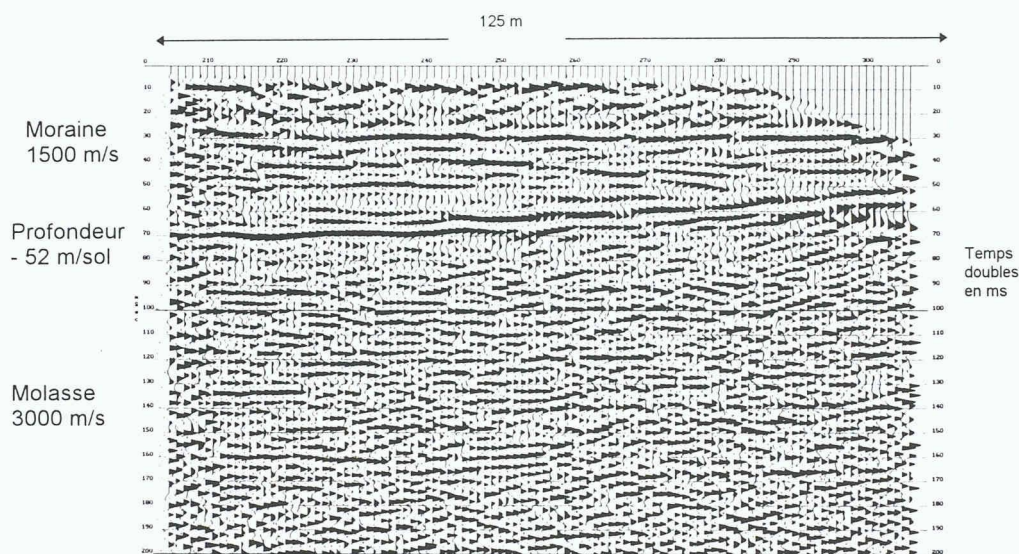


Fig. 6. – Exemple de profil sismique réflexion

des terrains en profondeur et effectuer une correction dynamique (NMO, Normal move out) avant l'addition des traces (Stack). Un stack de 12 signifie que la trace résulte de l'addition de 12 rayons sismiques réfléchis sur le même point miroir. Un enregistreur de 48 canaux permet un cumul de 24 trajets.

Une opération importante et délicate consiste à effectuer des corrections dites *statiques*, pour tenir compte de l'effet de la topographie et des terrains superficiels lents. L'effet topographique est maîtrisé en indiquant avec une bonne précision l'altitude des points de tir et celle des géophones.

L'épaisseur des terrains superficiels peut être estimée à partir des tirs de *sismique réfraction* ou des délais (*Delay*), c'est à dire en comparant les temps d'arrivées des premières ondes de tous les tirs de réflexion.

Pour effectuer le NMO, comme pour l'interprétation des profils sismiques, on doit connaître aussi précisément que possible les *vitesse sismiques* des terrains. Pour ce faire, on procède à des essais de correction dynamique avec diverses vitesses et l'on observe le résultat, les ré-

flecteurs étant le mieux marqués lorsque les vitesses sont correctes.

On peut éliminer les bruits parasites par filtrage. Evidemment, pour éviter de supprimer des réflexions il faut réaliser auparavant des spectres de fréquence, on peut aussi imposer des filtres passe bas (*low cut*) et passe haut (*high cut*).

Si les réflecteurs profonds sont inclinés, le point des réflexions apparentes sur les coupes sismiques ne correspond pas à leur position réelle. On les replace correctement au moyen d'une «migration».

L'informatique permet de modéliser un profil de sismique réflexion, soit pour tester si la méthode sera applicable à des vitesses et une géométrie données, soit pour vérifier si la théorie corrobore l'interprétation du profil sismique.

4.2 Exemple d'études par sismique réflexion

A Genève, cette méthode a servi à cartographier le sommet de la molasse sous la couverture morainique. Un profil réalisé dans ce but dans la plaine de l'Aire est démonstratif (fig. 6). Les géophones étaient disposés

tous les 2,5 mètres, l'énergie provenait de 3 à 4 coups de masse à 10 mètres du début de la ligne sismique et 24 géophones enregistraient le signal. Le dispositif était ensuite translaté de 2,5 mètres pour un nouveau tir. Le profil sismique obtenu est d'excellente qualité et le sommet des marnes et grès est parfaitement discernable, le profil a été prolongé sur près de 600 mètres, ce qui a permis d'observer l'apparition en profondeur des graviers (dits localement de *Alluvion ancienne*).

En Valais, cette même méthode s'est révélée parfaitement adaptée pour suivre l'enfoncement du rocher sous les dépôts récents de la plaine du Rhône. En réalisant des profils qui se recoupaient, la géométrie du *bedrock* a pu être représentée en trois dimensions.

4.3 Avantages et limites de la méthode

La sismique réflexion est une méthode destinée à des investigations souvent plus profondes qu'en sismique réfraction. A Genève, il a été possible avec un tel équipement de déterminer la position des calcaires urgoniens sous 1300 mètres de molasse en utilisant des charges explosives de 200 grammes. Il est également possible de prospecter à faible profondeur avec une très haute définition en réalisant des lignes le long desquelles les géophones sont distants de 1 m ou moins. Cette méthode est également applicable pour détecter des cavités souterraines. Dans ce cas, on réalise des profils le long desquels les géophones sont très proches. Cette distance dépend de la taille des cavités recherchées et de la profondeur d'investigation. L'application de la sismique réflexion se heurte toutefois à des problèmes pratiques si la topographie est très accidentée ou s'il existe en surface des éboulis secs et peu consolidés qui filtrent les ondes sismiques.

Cette méthode est également applicable sur l'eau en tirant une flûte marine derrière un bateau et en utilisant un canon à air (*Air gun*) comme source d'énergie, procédé très efficace et sans danger pour la faune. Les enregistreurs les plus modernes permettent l'acquisition de signaux de type vibrosismique, méthode usuelle dans la prospection pétrolière actuelle. Au lieu d'enregistrer le signal produit par une explosion ou quelques coups de masse, on enregistre un signal modulé de fréquence variable de plus faible intensité mais sur une longue durée. Les enregistrements corrélés ressemblent finalement à ceux des sources impulsives, mais sans les contraintes environnementales et légales liées à l'emploi de l'explosif.

5. Tomographie

5.1 Principe de la méthode

La tomographie sismique sert à analyser la qualité d'un massif rocheux de part et d'autre d'une galerie (*Cross gallery*) ou entre deux forages (*Cross hole*) (fig. 7). On produit des ondes sismiques d'un côté du massif et on enregistre les premières arrivées de l'autre côté. En effectuant 12 ou 24 tirs enregistrés sur 12 ou 24

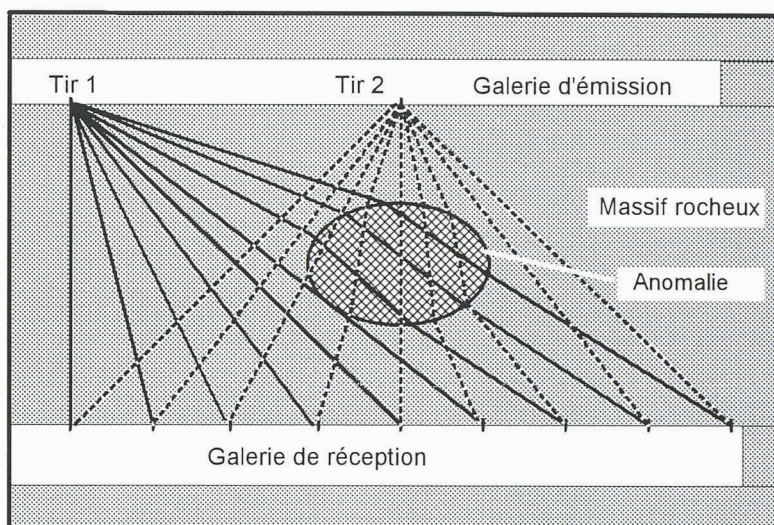


Fig. 7. – Schéma synthétique de la tomographie sismique

géophones, on dispose de 144 ou 576 temps de trajets. Connaissant la distance exacte grâce à un relevé topographique, le calcul des vitesses est immédiat. Dans un massif homogène, les vitesses devraient être très semblables. Une zone lente, ou plus rapide produira des anomalies dans les vitesses. Au moyen d'un programme informatique utilisant un calcul itératif complexe, il est possible de déterminer la forme de l'anomalie et sa vitesse. Celle-ci donne une bonne information sur sa nature pétrographique.

5.2 Exemple d'étude de tomographie sismique

La qualité du massif rocheux entre deux galeries est un problème qui se pose fréquemment aux ingénieurs chargés de la réalisation ou de l'entretien de barrages.

Pour un barrage en Suisse, cette méthode a été mise en oeuvre entre deux galeries distantes d'environ 65 m avec des mesures de vitesses longitudinales (fig. 8) et transversales. Connaissant la densité des terrains par échantillonnage, il a été possible de calculer le module d'élasticité

Fig. 8. – Répartition des vitesses longitudinales en km/s

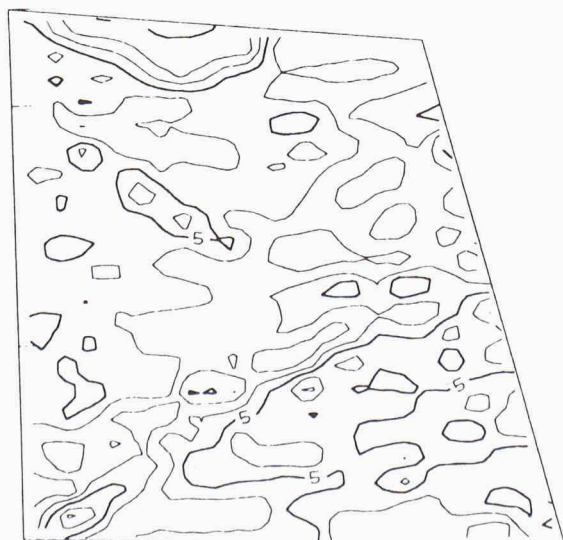
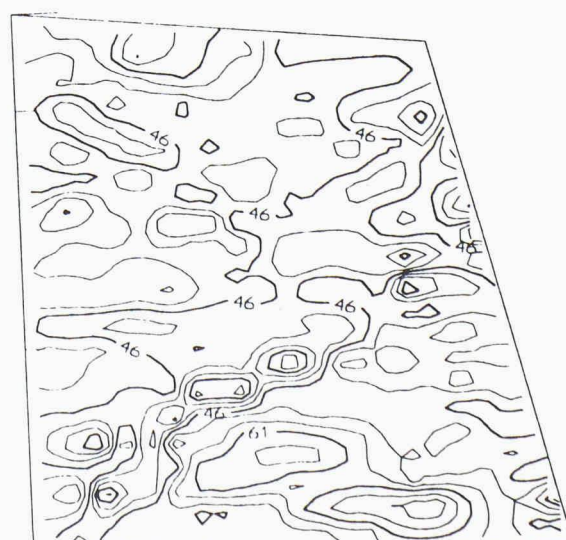


Fig. 9. – Répartition des modules de Young en Giga-Pascals



de Young et le coefficient de Poisson et de tracer à l'ordinateur une carte de répartition des modules de Young entre les galeries (fig. 9). Ce document et la carte de répartition des vitesses longitudinales prouvent l'existence d'une zone de roche lente, de mauvaise qualité mécanique, oblique entre les galeries et correspondant à une zone de faille broyée. Pour l'interprétation des résultats, plusieurs programmes informatiques très particuliers sont utilisés: pour calculer les temps de trajet des ondes *P* et *S* sur les enregistrements digitaux, pour déterminer la répartition des vitesses et enfin pour tracer des cartes d'isovitesse ou de répartition du module de Young.

6. Conclusions

Les méthodes géophysiques, sismiques en particulier, constituent un complément d'investigation très efficace aux campagnes de reconnaissance par forage. Avec une connaissance correcte de la géologie, il est possible de choisir une méthode adaptée, qui pourra précéder la campagne de forage et servira, dans ce cas, à implanter les forages dans les secteurs problématiques. Des profils sismiques réalisés à la suite des forages servent souvent à relier les horizons et vérifier s'il n'existe pas de variations lithologiques entre les puits. Les vitesses sismiques renseigneront l'ingénieur sur la qualité du matériel en profondeur, la compacité de la morai-

ne, l'altération du rocher. On trouve des tables de ripabilité des roches en fonction de leurs vitesses sismiques. Enfin, une campagne sismique, dont le coût métrique est très bas, peut parfois éviter la réalisation de forages inutiles, à un endroit par exemple où le rocher est trop profond et hors de portée de la machine.

Bibliographie

- [1] REDPATH B.B.: «Seismic refraction exploration for Engineering site investigation» AD-768 710, Nat. Tech. Information Service, US Dep. of Commerce Springfield, 1973
- [2] ASTIER, J.-L.: «Géophysique appliquée à l'hydrogéologie», Masson, Paris, 1971
- [3] MUSGRAVE, A. W.: «Seismic refraction Prospection», SEG Tulsa, 1967

Postformation ÉNERGIE + BÂTIMENT: inscriptions jusqu'au 24 juin!

Proposé pour la deuxième fois cette année, le cours *ÉNERGIE + BÂTIMENT* a pour objectifs de présenter l'évolution des connaissances et des techniques, de familiariser les participants avec les énergies renouvelables, et de promouvoir la maîtrise d'un art de construire associant économies d'énergie et rentabilité. Réservé aux professionnels déjà titulaires d'un diplôme d'architecte, d'ingénieur ou d'une formation de même niveau technique, ce cours comble, chemin faisant, les fossés entre spécialités pour ouvrir à une vision globale et multidisciplinaire.

La première édition du cours a vu affluer 89 participants qui visent à obtenir le certificat témoignant de l'extension de leurs compétences. Vu ce succès, une deuxième session débutera donc en septembre. Echelonnée sur environ 280 heures, elle se terminera en septembre 1995; son coût est de Fr. 2800.—.

Issu de l'initiative conjointe des services cantonaux et de l'Office fédéral de l'énergie, *ÉNERGIE + BÂTIMENT* est dispensé dans les Ecoles d'ingénieurs qui se sont associées au projet. Un programme détaillé y est à disposition et des renseignements sont aussi fournis par tous les services cantonaux romands de l'énergie.

Ecoles d'ingénieurs:

Fribourg: 037/82 41 41 Genève: 022/344 77 50

Le Locle: 039/34 12 12 Sion: 027/24 31 11

Yverdon: 024/23 21 11

L'EPFL à l'honneur aux USA: la solidification distinguée

Début avril, à San Francisco, le prestigieux prix Bruce Chalmers de la Société américaine de métallurgie, minéralogie et matériaux (TMS) a été décerné au professeur Wilfried Kurz du Département des matériaux de l'EPFL. Ce prix récompense chaque année «une personnalité dont les contributions dans le domaine et la technologie des procédés de solidification sont exceptionnelles». En trente ans de carrière scientifique consacrée à la solidification, le professeur Kurz en a exploré à la fois les aspects fondamentaux et appliqués. Il a étudié la croissance de deux phases solides à partir d'un alliage liquide (solidification des eutectiques), puis celle d'une seule phase solide (solidification des alliages dendritiques). Il étendra par la suite les théories de croissance de ces structures au cas de solidification rapide. Sur le plan pratique, après s'être intéressé à la coulée continue de l'acier, il a orienté les travaux appliqués de son laboratoire vers le traitement de surface par laser et créé, dans la foulée, le Centre de traitement des matériaux par laser (CMTL) avec le soutien de l'EPFL et de Sulzer Innotec.

Par ailleurs gestionnaire talentueux et homme de communication, «le professeur Kurz contribue tant par ses qualités humaines que scientifiques au rayonnement de l'EPFL et de son département des matériaux», selon les mots de Michel Rappaz et Gérald Zambelli, chef et adjoint de ce même département.