

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin technique de la Suisse romande
<b>Band:</b>	93 (1967)
<b>Heft:</b>	9
<b>Artikel:</b>	Possibilités et limitations des procédés géophysiques appliqués au génie civil
<b>Autor:</b>	Duffaut, P.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-69071">https://doi.org/10.5169/seals-69071</a>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 26.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

## ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes  
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)  
de la Section genevoise de la SIA  
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique  
de l'Université de Lausanne)  
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPF (Ecole poly-  
technique fédérale de Zurich)

## COMITÉ DE PATRONAGE

Président: E. Martin, arch. à Genève  
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne  
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève  
Membres:  
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.  
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Grosgeurin, arch.; J.-C. Ott, ing.  
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.  
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.  
Vaud: A. Chevallay, ing.; A. Gardel, ing.;  
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

## CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »  
Président: D. Bonnard, ing.  
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; J. Favre,  
arch.; A. Robert, ing.; J.-P. Stucky, ing.  
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

## RÉDACTION

D. Bonnard, E. Schnitzler, S. Rieben, ingénieurs; M. Bevilacqua,  
architecte  
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »  
Tirés à part, renseignements  
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

## ABONNEMENTS

1 an . . . . .	Suisse Fr. 40.—	Etranger Fr. 44.—
Sociétaires . . . . .	» 33.—	
Prix du numéro . . . . .	» 2.—	» 2.50

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,  
N<sup>o</sup> 10 - 5778, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au  
numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie  
La Concorde, Terreaux 29, 1000 Lausanne

## ANNONCES

Tarif des annonces:  

1/1 page . . . . .	Fr. 423.—
1/2 » . . . . .	» 220.—
1/4 » . . . . .	» 112.—
1/8 » . . . . .	» 57.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.  
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26, 1000 Lausanne et succursales



## SOMMAIRE

Possibilités et limitation des procédés géophysiques appliqués au génie civil, par P. Duffaut, ingénieur civil des mines.

Bibliographie. — Correspondance. — Divers. — Les congrès.

Société vaudoise des ingénieurs et des architectes.

Documentation générale. — Documentation du bâtiment. — Nouveautés, informations diverses.

## POSSIBILITÉS ET LIMITATIONS DES PROCÉDÉS GÉOPHYSIQUES APPLIQUÉS AU GÉNIE CIVIL<sup>1</sup>

par P. DUFFAUT, ingénieur civil des mines,  
Service géologique et géotechnique d'Electricité de France, Direction de l'Equipement

Il y a une opposition frappante entre l'efficacité universellement reconnue des procédés géophysiques dans la prospection pétrolière et la diversité des opinions que l'on rencontre à leur égard dans les professions du génie civil. Il semble qu'on puisse expliquer sommairement cette opposition: la plupart des clients du géophysicien n'en sont que des clients occasionnels, marqués souvent par le premier échec ou le premier succès. Au contraire les pétroliers profitent en plein de la loi des grands nombres, ils équilibrivent de nombreux échecs par des succès plus nombreux encore.

Quant à la raison profonde de ces succès ou de ces échecs, elle est tout simplement dans la nature des choses, c'est-à-dire dans le contenu géologique des paysages, comme on essaiera de le montrer dans la suite.

Cet exposé est strictement limité aux problèmes de génie civil, et il n'aborde ni l'écoute de bruits naturels ou provoqués, ni les effets sur les constructions d'explosions ou de tremblements de terre. Il est divisé en quatre parties :

1. Recherche des structures cachées<sup>2</sup>.
2. Recherche des propriétés des matériaux du sous-sol.
3. Interprétation mécanique des paramètres mesurés.
4. Auscultation dans le temps des massifs rocheux.

Les deux premières développent deux aspects étroitement complémentaires de toute prospection géophysique. Si aucune propriété ne varie dans le sous-sol, on ne peut définir aucune structure. Ainsi le problème général consiste-t-il dans la réponse simultanée à ces deux questions. On conçoit du moins que le choix de la méthode doive être dicté par celle des propriétés qui est le plus nettement contrastée, par exemple vitesse du son pour différencier un bed-rock dur sous une couverture meuble, résistivité pour localiser des sables dans une formation argileuse.

Les deux dernières débordent quelque peu le domaine géophysique classique, mais leurs développements inté-

<sup>1</sup> Conférence présentée devant les membres de la Société suisse de mécanique des sols et des travaux de fondation, le 4 novembre 1966, à Berne.

<sup>2</sup> Après la discussion qui a terminé la réunion, on a jugé souhaitable de développer cette première partie, davantage que dans l'exposé oral, notamment en ce qui concerne le sondage électrique.

ressent tout particulièrement les responsables de projets et d'ouvrages. En fait les trois dernières parties constituent maintenant une part très appréciable des moyens de connaissance utilisables en mécanique des roches.

## 1<sup>re</sup> PARTIE

### Recherche des structures cachées

La recherche de structures géologiques cachées, avec détermination simultanée de la *forme*, de la *position* et de la *dimension*, est, et restera sans doute, le principal objectif des procédés géophysiques.

Pour le géophysicien, il n'y a pas de différence de principe entre la recherche d'une structure pétrolifère, anticinal ou dome de sel caché sous les alluvions des Landes ou du Texas, et la recherche du bed-rock sous la moraine et les éboulis d'une vallée alpine (fig. 1). Les méthodes sont toutefois assez diversifiées et chacune a bien entendu des possibilités et des limitations qui lui sont particulières. Les exemples traités plus loin illustrent les principales.

Une fois la méthode choisie, son application est étendue à un certain domaine, en général à partir de la surface du sol, plus rarement à partir de tunnels ou de sondages. (En effet, une mesure isolée est presque toujours sans intérêt.) On obtient alors une *image* de la structure inconnue, dont la position et la dimension sont liées à celles de cette structure.

La formulation des lois physiques relatives à la propriété considérée permet de calculer, plus ou moins facilement, les *images* de structures géométriques simples. En gravimétrie ou en magnétisme, on connaît les images de la sphère, du cylindre et de quelques autres volumes élémentaires, et ces images sont additives, ce qui permet de représenter avec la précision voulue n'importe quel volume. En sismique réfraction et en sondage électrique, on connaît surtout les images de couches horizontales successives. À des anomalies connues de ces structures, on peut encore faire correspondre plus ou moins rigoureusement des détails dans les images calculées.

Mais c'est la démarche *inverse* que nous attendons trop souvent du géophysicien : définir la structure, simple ou non, à partir de l'image obtenue sur le terrain. S'il est facile de « dériver », il n'est pas possible en général d'« intégrer », car le catalogue complet n'existe pas et surtout la correspondance n'est pas toujours biunivoque : à une même image peuvent correspondre plusieurs structures. Ceci est d'autant plus vrai que les images sont moins précises.

Il est facile d'énumérer les conditions nécessaires à une bonne *définition* de l'image :

- la densité des points d'observation ;
- la précision des appareils employés ;
- la qualité des structures.

Le nombre des points de mesure est en général aussi grand que possible mais il est limité pratiquement par la dispersion des lectures. Cette dispersion n'est pas le fait des appareils, qui sont le plus souvent beaucoup plus précis qu'il n'est utile. Mais cette dispersion est le fait de la *nature*.

Lorsqu'on recherche une aiguille dans une botte de foin, on connaît du moins à l'avance la forme, la dimen-

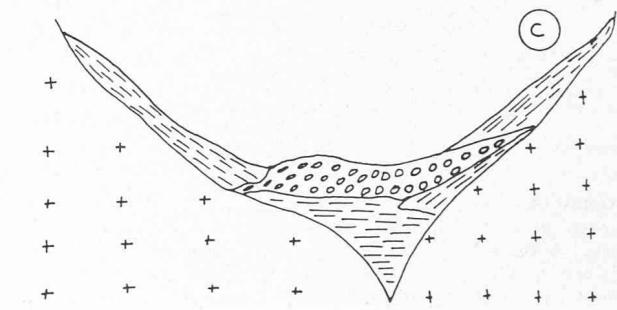
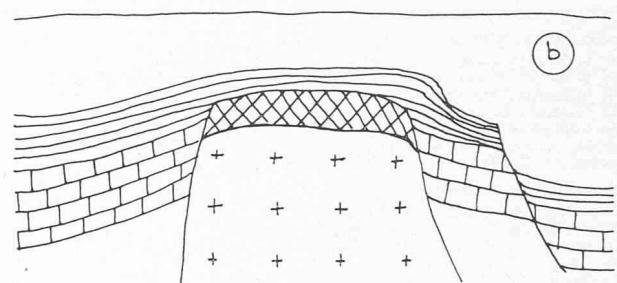
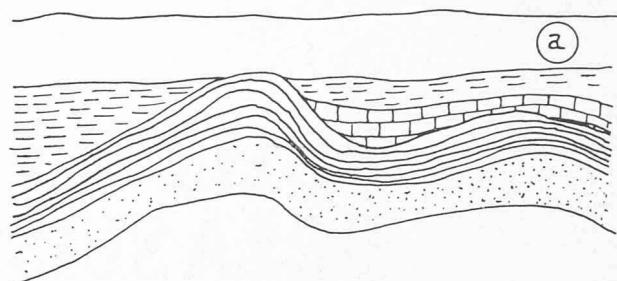


Fig. 1. — Problèmes structuraux accessibles à la géophysique.

a) Anticinal. b) Dome de sel. c) Bed-rock.

sion et le métal de l'aiguille ; dans les opérations de déminage, on sait encore que les objets cachés sont des corps métalliques, donc très conducteurs. En prospection géophysique, on sait avec une certitude au moins égale qu'aucune surface de séparation n'a des formes géométriques simples et régulières, et que dans la plupart des cas les matériaux sont très hétérogènes. Quelquefois même il n'y a pas de surface de séparation tranchée, mais une zone de transition où la propriété choisie change graduellement.

Ainsi l'insuffisance de qualité des structures peut se traduire soit par l'hétérogénéité des propriétés mesurables, soit par des surfaces de séparation trop courbées, soit par l'absence de séparation nette. Chacun de ces défauts introduit un genre de « flou » dans l'image et ces trois genres ne sont pas exclusifs.

S'il est rare que l'on connaisse à l'avance la forme et la matière comme pour l'aiguille dans le foin, il est plus rare encore que l'on n'ait aucune information, ni sur l'une ni sur l'autre. C'est la géologie locale qui fournit ce type d'information avec plus ou moins de certitude. Les chances de succès sont alors nettement améliorées. A défaut, on est conduit à faire des hypothèses basées sur la géologie régionale. Les exemples traités ci-dessous illustrent à la fois l'importance des informations préalables, la nécessité des hypothèses et

les limites de la confiance que l'on doit accorder aux résultats :

*1<sup>er</sup> exemple* : Grotte de la Pierre-Saint-Martin, dans les Pyrénées. En vue de l'exploitation hydro-électrique éventuelle d'un cours d'eau souterrain, Electricité de France voulait connaître, il y a une douzaine d'années, la position exacte d'une grotte déjà visitée. Les spéléologues avaient fourni une estimation de la forme et des dimensions de la grotte, mais n'avaient pu préciser suffisamment sa position en plan. Son volume était tel qu'une anomalie gravimétrique notable devait en résulter même à une grande profondeur.

L'existence d'un contraste suppose que la grotte recherchée est unique ou du moins que le calcaire encaissant n'est pas truffé de cavités même petites qui lui donnent, à partir d'un certain volume, une densité également affaiblie en toutes ses parties. En outre, l'application de la méthode suppose les résultats rapportés à une surface horizontale. Or, le plateau était coupé par un profond ravin, aux parois déchiquetées, dont le moindre éperon se traduisait par une correction du même ordre que l'anomalie recherchée. C'est donc l'insuffisante qualité de la surface du sol qui limite dans ce cas particulier l'emploi de la méthode gravimétrique et on a dû l'abandonner.

Appliquée récemment dans le sous-sol de la région parisienne, la même méthode a quelquefois confondu des cavités de dissolution dans les gypses et des remblais mal tassés [1]. On ne peut lui en faire le reproche, et le renseignement gardait une grande valeur pour le maître d'œuvre.

*2<sup>e</sup> exemple* : Anciens lits du Drac (près de Grenoble). Le site du barrage de Monteynard (fig. 2 et 3), aujourd'hui en service, bénéficie d'une gorge épigénique très étroite de 200 m de profondeur ; mais comme pour tous les autres sites de cette vallée, le réservoir correspondant est menacé de fuites par les alluvions perméables de l'ancien lit préglaciaire. Un large plateau de moraine recouvre cet ancien lit, dont on connaît avec certitude l'existence et la cote minimale. Il y a une vingtaine d'années, une prospection par sondages électriques n'avait pas donné de résultats exploitables.

Quelques années plus tard, une nouvelle prospection par sismique réfraction a connu au contraire un grand succès, qui a fait beaucoup pour introduire la pratique des méthodes sismiques dans nos problèmes<sup>1</sup>. Malgré une épaisseur de quaternaire atteignant 400 m, malgré un contraste de vitesses peu marqué entre les alluvions profondes cimentées et les marno-calcaires du lias, une large vallée a pu être dessinée, avec son plancher à la cote définie par la morphologie des environs.

Les reconnaissances géologiques avaient montré l'existence d'une vallée d'âge intermédiaire, déjà épigénique par rapport à la précédente, et gardant les caractères de jeunesse de la gorge actuelle (épaisseur et raideur des versants). Malheureusement, son tracé se situait dans une zone à topographie complexe, et les géophysiciens

<sup>1</sup> A la même époque, des succès avaient été enregistrés aussi dans le massif du Mont-Blanc, pour la reconnaissance du bed-rock de la Mer de Glace. Il est piquant de noter que ce sont des géophysiciens italiens et suisses qui ont connu ces succès à une époque où les géophysiciens français n'avaient pas abordé les problèmes de génie civil, tant est vrai que « nul n'est prophète en son pays ».

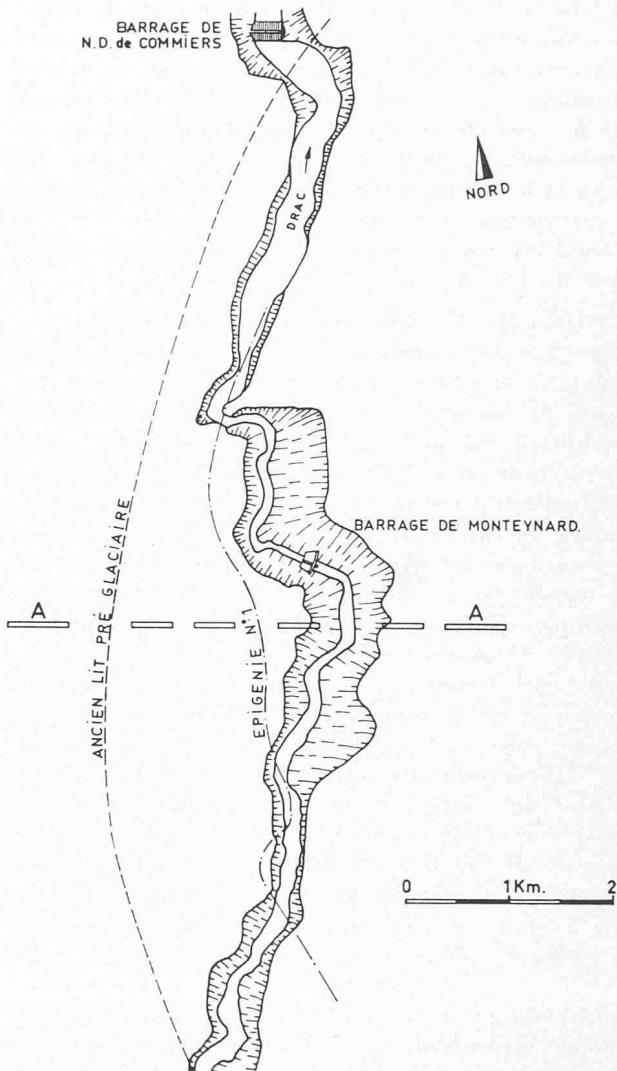


Fig. 2. — La vallée du Drac au niveau du barrage de Monteynard.

En tirets, les tracés des anciens lits successifs ; en hachures, les falaises vives bordant le lit actuel.

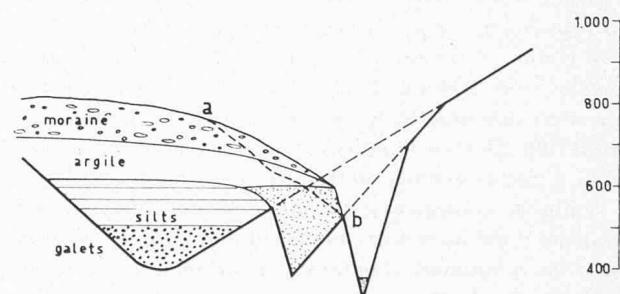


Fig. 3. — Coupe AA sur la figure 2. Dans la zone ab, nombreux ravins creusés dans les alluvions et gênant l'interprétation des mesures sismiques.

ont préféré la nier. Or il est facile de montrer (fig. 4) que la méthode sismique réfraction est incapable de découvrir (comme de nier) un sillon suffisamment étroit par rapport aux irrégularités de la surface.

L'image d'un profil est le graphique espace-temps (dromochrone). Dans une structure élémentaire à deux couches, il est facile de constater que l'image d'un sillon

de largeur donnée est un décrochement dans la droite représentant la couche. Mais réciproquement les points de mesure ne s'alignent pas exactement sur les droites théoriques. Les irrégularités superficielles, les erreurs sur les corrections topographiques, les variations de vitesse avec la profondeur introduisent un flou qui s'oppose à l'identification de ce décrochement, donc à la reconnaissance du sillon.

Dans ces deux exemples, on peut dire que le niveau élevé du bruit masque le *signal* recherché.

3<sup>e</sup> exemple : On illustrera l'emploi du sondage électrique sur un exemple publié par Lugeon et Oulianoff [2]<sup>1</sup>, et concernant la coupe du Valais dans la région de Martigny. La figure 5 donne en haut les résultats de mesure, c'est-à-dire les résistivités apparentes en ordonnées pour des longueurs de ligne croissantes de 30 à 750 m. Les deux échelles sont logarithmiques ; en effet les rapports d'épaisseur et les rapports de résistivité sont les variables réduites qui permettent de représenter tous les problèmes par un même jeu d'abaques qu'il suffit de superposer par translation aux résultats de mesure. Pour les faibles longueurs de ligne, cette courbe présente un palier à 300  $\omega\text{.m}$  et ceci est l'indice d'une couche superficielle homogène d'une grande épaisseur. Il est très rare qu'on ait cette chance, qui est pourtant nécessaire pour utiliser l'*abc* de la méthode du sondage électrique, c'est-à-dire l'abaque à deux couches. Après le palier, on trouve une branche descendante, annonçant une couche profonde plus conductrice. Si cette deuxième couche avait une extension indéfinie en profondeur, cas précis d'établissement de l'abaque à deux couches, la courbe serait du type dessiné en bas en trait gras. Le palier ou plus exactement l'asymptote, qui termine cette abaque, à droite, indique la résistivité de la deuxième couche. On voit qu'on ne l'atteint que pour une épaisseur de l'ordre de 10 fois celle de la couche supérieure<sup>2</sup>. Mais la pente de la courbe de raccordement est également caractéristique ; il suffit donc d'une épaisseur moindre pour atteindre et identifier son point d'inflexion. On peut donc choisir la courbe du contraste 1/4, qui correspond à partir d'une résistivité de 300 en surface à 75  $\omega\text{.m}$  en profondeur, et par superposition la « croix » de l'abaque donne en lecture directe l'épaisseur de la première couche, soit 100 m. Il est assez naturel de supposer que sous une grande épaisseur d'alluvions grossières on trouve en effet un remplissage lacustre plus fin, susceptible d'une résistivité nettement plus faible.

Enfin la courbe expérimentale se termine par une branche remontant fortement. On démontre qu'un substratum infiniment résistant a pour image une droite à 45 degrés. Cette pente est ici dépassée, ce qui peut indiquer que la forme du substratum est en cuvette, et ceci ne nous étonnera pas : il s'agit du bed-rock de l'auge glaciaire. La détermination précise de sa profondeur est rendue difficile par cette différence avec les images d'un catalogue beaucoup trop limité. On donne en bas de la figure trois exemples d'abaque à trois couches correspondant à des profondeurs de 250, 500

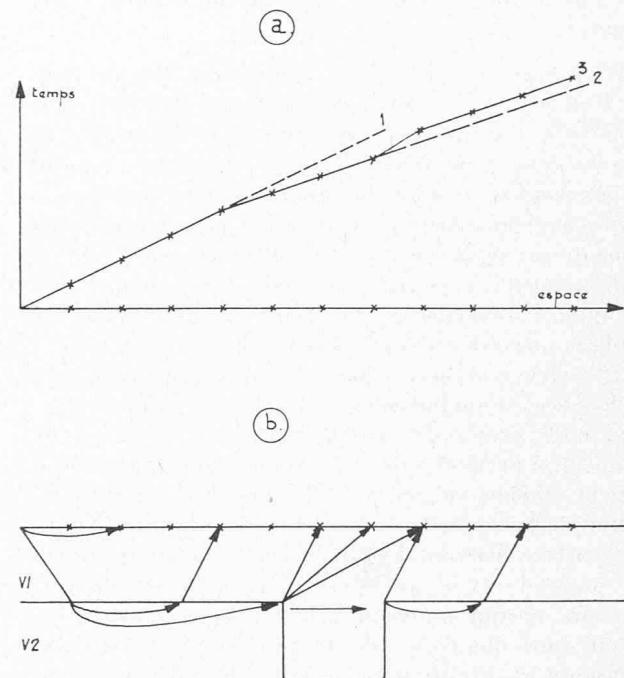


Fig. 4. — Courbe espace-temps théorique (a) pour un milieu à deux couches (b) présentant un sillon.

1. Onde directe dans la couche superficielle.
2. Onde réfractée dans la couche inférieure supposée continue.
3. Onde retardée par un sillon infiniment profond.

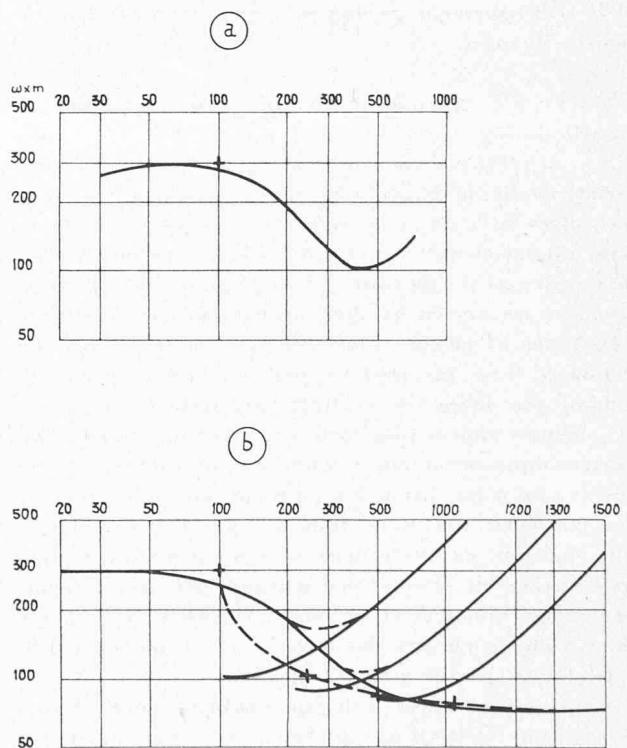


Fig. 5. — Sondage électrique à Martigny.

- a) Résultats de mesure sur papier « log-log ».
- b) Courbe de contraste 1/4 extraite de l'abaque à deux couches et positions des branches à 45° pour trois hypothèses différentes sur la profondeur d'un bed-rock infiniment résistant.

et 1100 m. Pour la plus profonde, l'identification des trois couches successives est facile, et sous réserve de la différence de forme signalée, la précision serait bonne, disons meilleure que 0,1. Pour la moins profonde, on

<sup>1</sup> Le dispositif Wenner employé ne permet pas la stricte application des abaques Schlumberger et les valeurs données ici n'ont de valeur que comme exemple d'interprétation.

<sup>2</sup> Ce facteur varie légèrement en fonction du rapport des résistivités.

voit que le tronçon intermédiaire est insuffisant pour identifier la couche intermédiaire, en position et en résistivité ; il faudrait pouvoir la déduire d'essais sur d'autres profils où les conditions géométriques seraient plus favorables. Dans le meilleur cas, l'incertitude sur le bed-rock dépasserait sans doute 0,25.

Dans le cas intermédiaire, qui correspond à l'exemple traité, c'est seulement la forme particulière de la structure qui s'oppose à une bonne définition. Mais il est raisonnable d'admettre une profondeur comprise entre 400 et 500 m. Les valeurs les moins profondes correspondent à l'existence de couches plus conductrices insuffisamment épaisses pour se manifester clairement (c'est-à-dire par un tronçon de courbe qui en permette l'identification).

\* \* \*

De ces exemples on retiendra d'abord deux traits systématiques, qui sont d'ailleurs étroitement liés :

— D'abord le rôle considérable joué par la partie la plus superficielle du sol, la *peau*, qui est souvent accidentée dans sa forme, et qui est toujours très hétérogène. Les très fortes résistivités ou les très faibles vitesses sont déjà souvent un obstacle physique à la transmission nécessaire d'un signal. Leurs variations aléatoires brouillent ce signal d'autant plus facilement qu'il est plus faible. Cet inconvénient peut disparaître si on recherche des structures assez profondes.

— Ensuite l'impossibilité de percevoir des structures profondes si leur dimension n'est pas en rapport avec leur profondeur. Ainsi dans le sondage électrique on ne peut reconnaître et localiser des couches successives que si leurs épaisseurs croissent en *progression géométrique*. A défaut, on percevra seulement la résistivité moyenne<sup>1</sup> d'un ensemble de couches suffisamment épais. La même limitation intervient en gravimétrie ou en sismique<sup>2</sup> et c'est elle qui explique le rôle de la peau.

On peut alors classer sommairement les problèmes structuraux posés aux géophysiciens en trois catégories :

— Les problèmes *faciles* : s'il existe une structure connue et contrastée qu'il suffit de localiser. Le type en est dans le génie civil le bed-rock dur sous une couverture meuble ; le problème est d'autant plus facile que le terrain et le bed-rock sont peu accidentés, il peut être compliqué par une couche superficielle défavorable (éboulis grossiers, lapiaz calcaires).

— Les problèmes *difficiles* : si la structure est connue mais peu contrastée, ou bien contrastée mais complexe, voire inconnue. Dans le premier cas, on augmentera les chances de succès en plaçant les profils de mesure dans la direction la plus favorable (la plupart des structures géologiques sont en effet allongées).

— Les problèmes *insolubles* : lorsque le contraste est très faible et la structure très complexe, lorsque les éléments à reconnaître sont « vus sous un angle trop faible », on ne peut espérer séparer le signal utile du bruit, et la géophysique est impuissante. Les limitations ne jouent pas toutefois de la même manière pour les différentes méthodes et il faut refaire la classification pour chacune.

Il est important d'insister sur le caractère particulier des dispersions et difficultés de ces méthodes : les écarts par rapport aux structures géométriques simples, les hétérogénéités des matériaux bravent toute tentative de calcul, aussi perfectionné soit-il. Aucune analyse statistique ne peut permettre de choisir entre deux structures possibles, car aucune loi des grands nombres ne leur est applicable. Seul un géologue régional expérimenté peut proposer la structure la plus probable, et la mesure de cette probabilité reste purement *subjective*.

## 2<sup>e</sup> PARTIE

### Recherche des propriétés des matériaux du sous-sol

Il est bien rare qu'on ignore tout à l'avance des roches existant en profondeur et qu'on demande au géophysicien de les identifier, mais de plus en plus fréquemment on souhaite préciser certaines de leurs qualités.

Le premier problème serait d'ailleurs souvent insoluble, car les catégories géologiques ne sont pas mises en évidence par les échelles de résistivité ou de vitesse : n'importe quelle roche non salée peut avoir une résistivité de 100 à 150  $\omega \cdot m$  ou une vitesse de 2500 m/s. La combinaison même de ces deux valeurs peut encore s'appliquer à des calcaires ou grès tendres, à des roches éruptives altérées, ou même à des alluvions consolidées.

Lorsqu'on sait déjà si l'on a affaire à des roches meubles, à des roches sédimentaires ou à des roches éruptives, un classement par ces deux paramètres garde quelque valeur, comme le montrent les figures 6a, b et c. Sur la figure 6a en particulier, on identifie nettement les solutions salées et la sécheresse absolue en électrique, la nappe phréatique en sismique. Mais le graphique d'ensemble (fig. 6d) n'est guère susceptible d'utilisation pratique.

Si la géophysique ne peut valablement *identifier* une roche cachée inconnue, elle peut toutefois, en présence d'une roche que l'on croit connaître, attirer l'attention sur le caractère normal ou non des paramètres mesurés sur le terrain. Cette pratique fréquente conduit à l'utilisation *paramétrique*, qui différencie les avatars d'une même roche par la gamme de ses propriétés.

Ainsi un massif de granit banal peut-il être recouvert d'une zone d'altération superficielle, plus ou moins épaisse, et traversé de zones broyées. Ces variations qui rejoignent directement sur les propriétés mécaniques<sup>1</sup> seront traduites par une diminution à la fois des résistivités et des vitesses. De même dans une plaine alluviale, les zones les plus conductrices seront aussi les moins perméables. A la limite, le paramètre mesuré peut être utilisé directement ; c'est le cas de la recherche des zones conductrices pour placer des prises de terre.

On obtient ainsi un *classement relatif* que l'on a pu appliquer aussi à des matériaux artificiels (par exemple le revêtement en béton de tunnels anciens en Espagne, où les zones altérées ont été rapidement localisées par une prospection électrique), et qui rejoint les méthodes non destructrices largement utilisées au laboratoire (surtout sismiques). Au laboratoire d'ailleurs, on a pu caractériser, grâce à la vitesse du son, l'anisotropie de certains granites, anisotropie qui est sans doute surtout celle de la microfissuration [3].

Ces méthodes paramétriques ont été largement développées dans la dernière décennie pour la reconnaissance des sites de barrage. Seules en effet elles permettent de caractériser le massif rocheux à l'échelle capitale de la dizaine de mètres. Au dernier Congrès des Grands Barrages, elles étaient citées dans la plupart des pays, bien que négligées par quelques-uns des principaux experts mondiaux (Müller en Autriche, Talobre en France, Rocha au Portugal).

<sup>1</sup> Ou plutôt l'inverse de la conductivité moyenne.

<sup>2</sup> Sauf en sismique réflexion.

<sup>1</sup> Un exemple remarquable est la mesure de vitesse sismique proposée par Caterpillar pour déterminer si une roche identifiée nécessite l'emploi de l'explosif, du rieur ou du bulldozer.

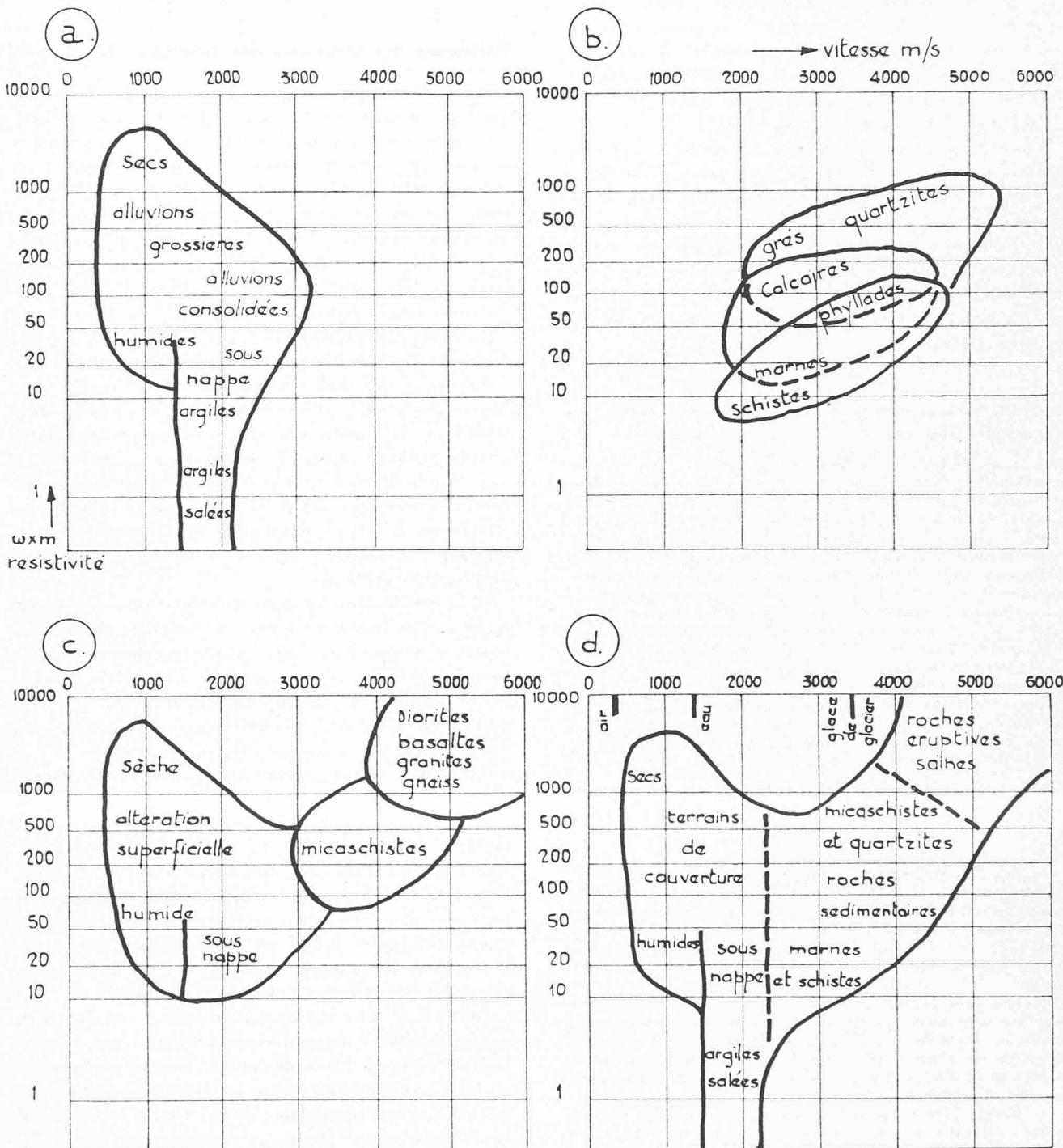


Fig. 6. — Classement des roches en fonction des deux principaux paramètres géophysiques, vitesse en abscisses, résistivité en ordonnées.

a) Alluvions et sédiments non consolidés.  
 b) Roches sédimentaires (sauf le sel).

c) Roches éruptives et métamorphiques.  
 d) Ensemble des roches.

Parmi tant d'exemples récents, il faut citer au premier rang deux procédés particuliers qui évitent les inconvénients déjà signalés dus à la surface du sol :

1<sup>o</sup> L'emploi de points d'émission et de réception situés en galerie ou en sondage, avec des trajets sismiques parallèles ou en éventail. Cette méthode est appliquée depuis peu mais sur une grande échelle en Italie par l'Ente Nazionale per l'Energia Elettrica, avec l'aide de géophysiciens universitaires milanais. Une publication au Congrès de Lisbonne [4] en cite les premières applications, d'où est tirée la figure 7, mais d'autres

sont plus importantes, notamment pour l'usine souterraine en projet de Lago Delio, à la frontière suisse. On notera particulièrement la spécialisation des forages, pour l'émission ou pour la réception, et la répétition des mesures.

2<sup>o</sup> Le « carottage » sismique des sondages, où un ensemble émetteur-récepteur de faible longueur, 1 à 2 m, est descendu le long d'un sondage. On peut répéter la mesure aussi souvent que l'on veut, par exemple tous les 0,5 m. Cette technique pétrolière n'a été employée que très timidement à l'échelle des sondages de travaux

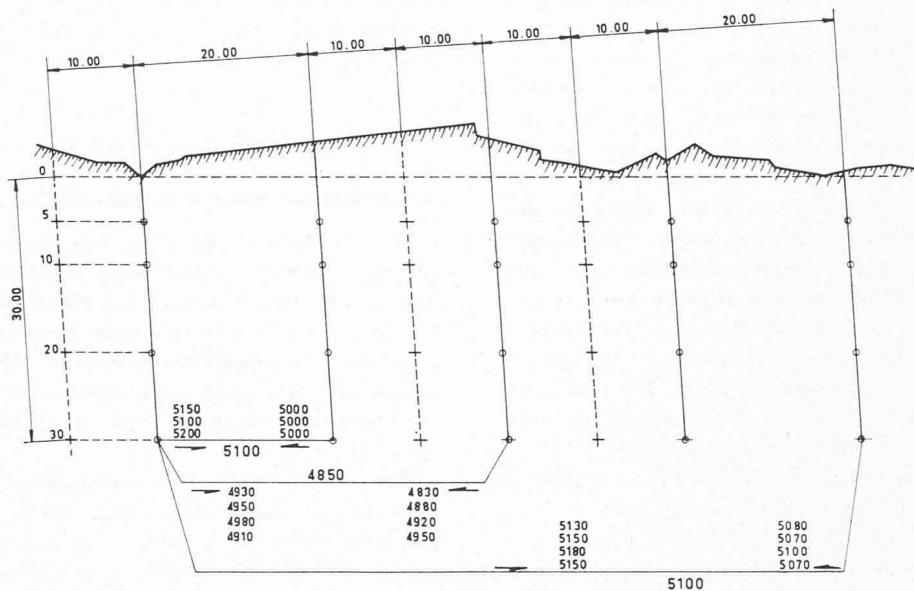


Fig. 7. — Profil étudié par ENEL au voisinage du barrage de Pantano d'Avio.

En traits interrompus, forages spécialisés pour l'émission (à explosif). Les résultats des mesures successives sont donnés à titre d'exemple pour quelques trajets seulement.

publics, malgré de nombreux encouragements. C'est la même équipe ENEL - Polytechnicum de Milan qui peut présenter aujourd'hui l'expérience la plus complète. Non seulement tous les sondages de leurs profils (cf. fig. 7) sont explorés de cette façon, mais là encore les mesures ont été répétées un grand nombre de fois. La fidélité des mesures s'avère du même ordre que la précision de lecture, c'est-à-dire environ 0,03 sur la vitesse. Cette fidélité justifie les applications citées ci-dessous dans la 4<sup>e</sup> partie.

On remarque la prééminence des méthodes sismiques dans ce domaine. Pourtant la résistivité est un paramètre extrêmement sensible en mécanique des sols. Bjerrum cite un glissement de terrain pour lequel le carottage électrique des sondages a seul permis de mettre en évidence quelques millimètres d'épaisseur d'une argile à teneur en eau particulièrement élevée. En France, le professeur Berthier a montré que la limite de plasticité des mélanges d'eau et d'argile correspond à un changement dans leur comportement électrique. L'étude des glissements de terrain, et peut-être aussi la surveillance des talus artificiels comme les crassiers de mine pourraient trouver dans les méthodes électriques des possibilités nouvelles.

### 3<sup>e</sup> PARTIE

#### L'interprétation mécanique des paramètres géophysiques

L'interprétation mécanique classique des célérités s'appuie sur les équations de la propagation des ondes : outre les ondes de surface, toujours négligées, il se propage deux sortes d'ondes de volume dans les solides, une seule dans les liquides. La connaissance des deux célérités permet de calculer deux constantes élastiques, soit les paramètres  $\lambda$  et  $\mu$  de Lamé, soit le couple  $E, v$  ; module de Young et coefficient de Poisson, qui a eu plus de succès pratique (surtout parce que l'on néglige

le plus souvent les variations possibles du deuxième, comme l'a fait remarquer Habib [5]). La figure 8 montre la détermination sismique de ces paramètres, en fonction du couple des célérités.

Les essais dynamiques ont eu de brillantes applications au laboratoire : les modules ainsi déterminés sur échantillons sont souvent proches des modules mesurés sous la presse en compression simple. A l'intérieur de familles homogènes, on a publié d'étroites corrélations entre modules et résistances. Mais c'est surtout pour suivre l'évolution d'un même échantillon pendant tel ou tel traitement que cette méthode est efficace.

Malheureusement, à l'échelle du terrain, les modules « dynamiques », sur qui beaucoup d'espérances avaient été fondées, se sont avérés hors de proportion avec les modules « statiques » mesurés à l'échelle du mètre. Ceux-là sont en effet compris surtout entre  $2.10^5$  et  $10^6$  bars, alors que ceux-ci tombent plutôt entre  $2.10^4$  et  $2.10^5$  et les rapports publiés à ce jour s'échelonnent de 2 à 10 ou même davantage, dans le cas du site de Malpasset [6].

Si beaucoup d'auteurs se passionnent pour étudier ce rapport, souvent à la lumière de modèles rhéologiques plus ou moins compliqués, ils sont loin d'aboutir à des conclusions communes sinon sur un point : plus ce rapport est élevé, plus mauvaise est la qualité du massif rocheux. On peut verser au débat une explication parmi d'autres possibles : en effet l'assemblage de blocs qui constitue le massif rocheux présente du jeu irrégulièrement réparti le long des joints, surtout au voisinage des versants. Lorsqu'on le déforme, c'est d'abord la déformation de ces surfaces en contact imparfait qui se manifeste, et celle des produits de remplissage éventuels. Il n'y a aucune raison pour que la méthode sismique puisse prendre en compte un tel phénomène.

Abandonnant donc le module, que peut-on espérer de la propagation des ondes ? On a déjà vu que les « vitesses » classiques, c'est-à-dire les célérités des ondes de compression, variaient en fonction de la qualité, mais

celles des ondes de cisaillement sont beaucoup plus sensibles aux défauts du rocher. Dans les carottages sismiques de l'ENEL cités ci-dessus, on voit l'arrivée des ondes transversales se décaler très sensiblement sur les sismogrammes au niveau des zones broyées ; qui plus est, elles tendent à disparaître, ce qui montre qu'elles s'atténuent bien davantage que les ondes de compression. Comme l'atténuation dépend largement des interfaces, c'est un critère extrêmement intéressant mais encore difficile à étudier. L'atténuation varie d'ailleurs beaucoup avec la fréquence. Non seulement les hautes fréquences sont dans l'ensemble les moins bien transmises, mais surtout le rocher se comporte comme un jeu de filtres sélectifs, en fonction peut-être des « mailles » de la fissuration, et le spectre de fréquence reçu est susceptible d'une analyse nouvelle dans ce sens.

Ces différents paramètres ont été réunis par Schneider en une image globale pour différencier les sites de barrage les plus divers [6]. Allant plus loin, Bollo propose l'emploi d'ondes cohérentes ; il a utilisé avec succès la mise en résonance de pieux moulés en béton par un vibrateur à balourd pour en connaître la qualité. Ceci s'apparente à des mesures exécutées par Caloi sur des monolithes ou éperons rocheux des vallées des Dolomites [7].

Beaucoup de recherches sont encore nécessaires pour tirer le maximum de ces déterminations, mais dès main-

tenant on peut souhaiter que s'accumulent des expériences aussi complètes que possible sur les sites de grands travaux.

#### 4<sup>e</sup> PARTIE

##### L'auscultation dans le temps des massifs rocheux

On n'a compris qu'assez tardivement que la géophysique pouvait servir aussi bien ou mieux dans le temps que dans l'espace. En effet, lors de répétitions des mesures aux mêmes points, bien des difficultés précédemment évoquées disparaissent. Même si l'interprétation des variations géométriques ou mécaniques est incertaine, le sens au moins de ces variations est directement utilisable.

Pour parler d'abord des méthodes sismiques, rappelons que les expériences déjà citées de l'ENEL ont établi la fidélité nécessaire à cette répétition. Une autre expérience, de laboratoire, peut servir à mieux comprendre le sens des variations : elle a été publiée par Habib et Vouille [8] et s'applique à des échantillons de quartzite particulièrement compacts. La célérité des ondes longitudinales a été mesurée à l'intérieur d'un appareil triaxial, et elle a augmenté de 4000 à 6000 m/s en fonction de la contrainte, que le tenseur soit isotrope (pression hydrostatique) ou non (compression axiale

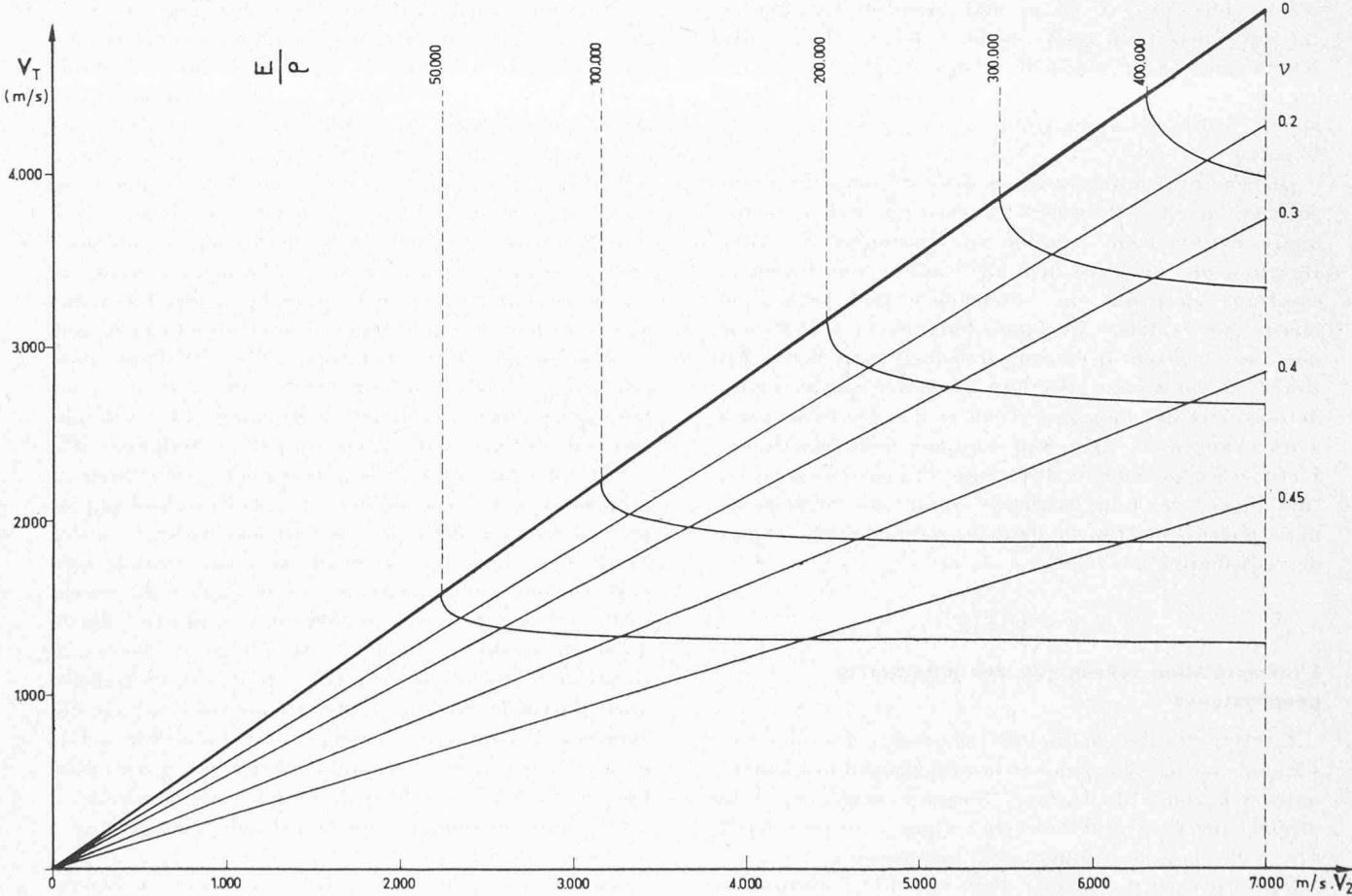


Fig. 8. — Détermination du coefficient de Poisson (droites passant par l'origine) et du module d'élasticité, à partir des célérités des ondes longitudinales et transversales portées respectivement en abscisses et en ordonnées. L'anisotropie enlève beaucoup d'intérêt à ce graphique, qui permet toutefois de discuter la précision en fonction des célérités.

supplémentaire). Une telle augmentation dépasse très largement ce que peut expliquer la déformation élastique d'un milieu continu de même module. Une seule explication est proposée : cette roche n'est continue qu'en apparence. Elle contient en fait un très grand nombre de discontinuités susceptibles d'être refermées seulement par des efforts de compression très élevés, et le trajet sismique, obligé de zigzaguer entre ces fissures, est raccourci lorsqu'elles sont refermées.

C'est donc le serrage d'un discontinu, serrage inappréciable par des mesures de déformation, qui est mis en évidence par l'auscultation sismique. Les mêmes auteurs ont pu préciser l'anisotropie de cette variation de célérité dans les essais monoaxiaux, ce qui confirme l'interprétation ci-dessus. On peut donc penser que sur le terrain cette même méthode trouvera la même application. En particulier ont été très remarqués les résultats publiés en Italie pour le versant du Mont-Toc, qui devait s'écrouler en 1963, dans la catastrophe de Vajont-Longarone [9] : d'après des profils sismiques exécutés avant et après le petit glissement prémonitoire de 1960, le module dynamique du sous-sol était passé en chiffres ronds de  $10^6$  à  $10^5$  bars (ou, si l'on préfère, la vitesse avait été divisée par trois). Ces résultats, alors inexpliquables, paraissent maintenant le signe d'une complète désorganisation du massif rocheux.

Sur les chantiers de barrages, cette méthode est proposée depuis bientôt dix ans pour apprécier l'éventuelle consolidation par injections. Sur les chantiers de tunnels elle peut servir à définir périodiquement l'épaisseur de la zone décomprimée (tunnel du Mont-Blanc en particulier). On commence à envisager sérieusement l'étude par le même moyen de l'effet des tirs ou de différents autres traitements. La difficulté réside seulement dans le choix, l'établissement et la conservation des points de mesure. Les travaux souterrains voisins des fondations et singulièrement les sondages se prêtent bien à la mise en place des points de réception. L'émission dans les mêmes conditions est à l'étude et des réalisations prochaines sont probables.

Sur l'un des derniers barrages voûtes construits en France, le barrage de Roujanel, dans le département de l'Ardèche, nous disposions de géophones scellés dans des sondages de part et d'autre du barrage pour assurer d'abord le contrôle d'un traitement de consolidation (fig. 9) [10]. Nous avons donc continué à exploiter ce réseau pendant les premières années de l'utilisation de la retenue. Nous avons constaté des variations de vitesse importantes, parfois jusqu'à 40 %, toujours très supérieures aux erreurs de mesure. En outre les variations apparaissent en partie réversibles et se comparent très bien aux résultats extensométriques fournis par des

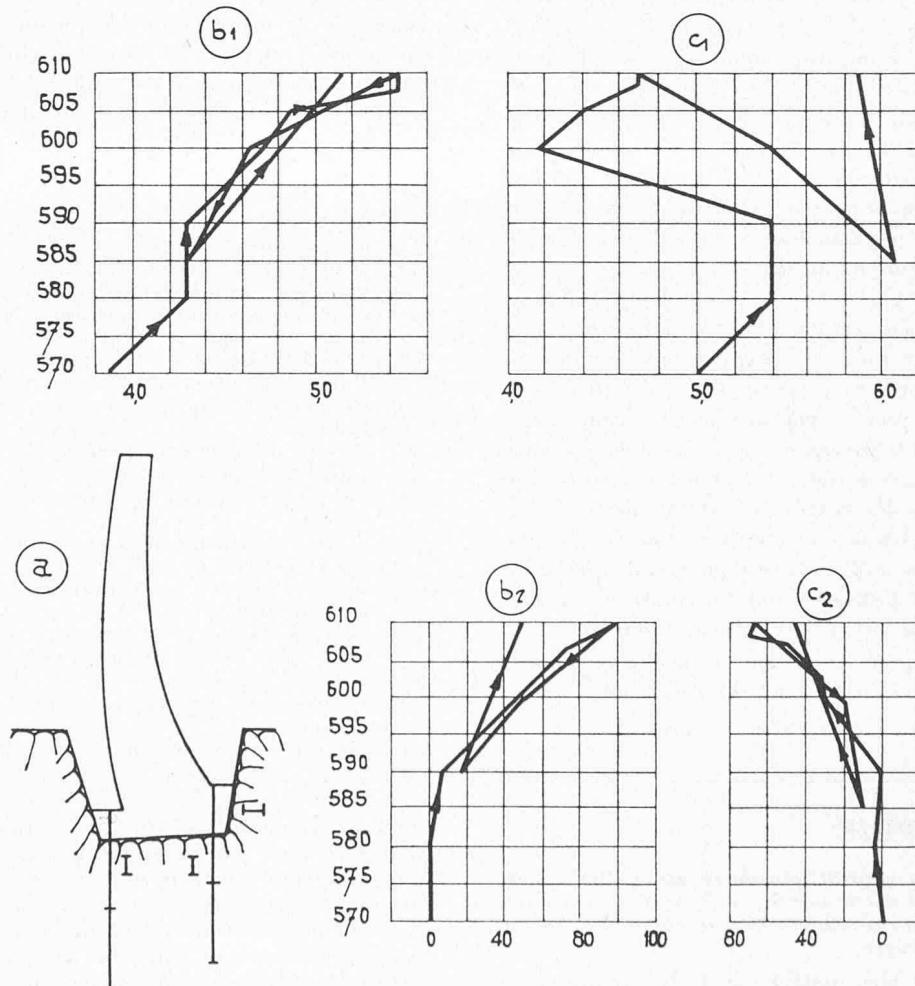


Fig. 9. — Auscultation sismique du barrage de Roujanel.

- a) Position des géophones et des témoins sonores placés dans le rocher, par rapport à une coupe du barrage.
- b) Comparaison entre trajet sismique aval et témoin sonore aval.
- c) Comparaison entre trajet sismique amont et témoin sonore amont.

cordes vibrantes (fig. 9b et c). Au pied aval du barrage, le remplissage resserre manifestement le rocher, au pied amont au contraire le rocher se desserre. Nous avons prévu de renouveler cette expérience sur plusieurs chantiers en cours.

Les méthodes électriques peuvent aussi s'appliquer dans le temps. Le professeur Berthier a proposé de les utiliser pour déceler l'altération d'un massif de roche cristalline. Bollo, après avoir localisé les fuites d'un barrage en terre, propose de surveiller ainsi le noyau ou la fondation d'autres ouvrages. On touche donc à l'art du sourcier, que le professeur Rocard a pu justifier en partie par le déplacement de l'individu sensible (ce « sixième sens » restant mystérieux) dans le champ électrique créé par l'écoulement en milieu poreux [11].

### Conclusions

Quoi qu'il en soit, beaucoup de sourciers sont seulement des charlatans. Que doit-on donc penser des géophysiciens ? D'abord qu'aucun mystère ne subsiste dans leur activité.

Mais, comme pour beaucoup de professions discutées, on peut avoir tendance à s'abriter derrière un aphorisme classique du type : « La géophysique vaut ce que vaut le géophysicien ». Or ce n'est qu'en partie vrai. Dans le comportement des géophysiciens, la responsabilité des clients est considérable. De bons clients obtiendront à coup sûr beaucoup plus d'un même géophysicien sur un même problème.

Nous devons absolument comprendre d'abord la nature des problèmes géophysiques, leur *essence géologique*, donnée sinon connue, et leur *apparence mathématique*, qui ne signifie pas précision. Nous devons surtout faciliter à tout instant l'échange d'informations entre géologie et géophysique. Ce point, qui a fait l'objet d'une discussion particulière au récent congrès de Lisbonne, mérite une explication.

En effet, le géologue se trouve psychologiquement en infériorité<sup>1</sup> ; trop souvent l'ingénieur lui accorde moins de confiance parce qu'il ne s'exprime pas comme lui dans le langage mathématique, et aussi, il faut le dire, parce qu'il coûte moins cher que le géophysicien ! A l'occasion des profils sismiques ou des sondages électriques, on n'hésite pas à faire couper des arbustes pour faciliter le passage des câbles. A-t-on jamais facilité la pénétration du géologue « nu » dans les fourrés ? A plusieurs reprises des affleurements nouveaux éclairant définitivement un problème ont été ainsi découverts grâce aux exigences des géophysiciens. Il faut donc tout mettre en œuvre pour éviter que le géologue ne voie dans le géophysicien un concurrent privilégié.

<sup>1</sup> Cette remarque ne concerne évidemment pas Electricité de France.

## BIBLIOGRAPHIE

**Industrializzazione e prefabricazione nell'edilizia scolastica**, tiré à part des numéros 4 et 5 (avril et mai 1966) de la revue *l'Industria Italiana del Cemento*. — Un volume 22×30 cm, 356 pages.

Cet ouvrage fort bien illustré par de très nombreuses figures et photos passe en revue l'ensemble des problèmes qui se posent lors de l'application de méthodes industrielles à la construction de bâtiments scolaires.

Après avoir évoqué les questions propres aux cons-

tructions scolaires, les auteurs examinent le rôle qui peut être joué par la préfabrication dans ce secteur. Une importante partie de l'ouvrage est consacrée à l'analyse des différents systèmes et de leurs applications.

Avant de se terminer par une rétrospective des réalisations récentes en Italie, un chapitre est consacré à certains problèmes technologiques posés par les procédés modernes de construction.

Tous ceux qui ont affaire soit aux constructions scolaires soit à la préfabrication prendront grand intérêt à la consultation de cet ouvrage.

## LISTE DE RÉFÉRENCES

- [1] ARNOULD & NEUMANN : Annales ITBTP (à paraître incessamment). Paris.
- [2] LUGEON et OULIANOFF : L'alluvion du Rhône valaisan. Essai de détermination de l'épaisseur par la méthode électrique. *Bulletin du Laboratoire de géologie de l'Université de Lausanne*, n° 64, 1938.
- [3] AVELINE, BAUDRAN, HABIB, ISNARD, LEYMARIE et MORLIER : *Sciences de la Terre*, tome 9, n° 4. Nancy.
- [4] BERTACCHI et al. : *Communication 1/10*, Congrès de Lisbonne.
- [5] HABIB : *Rapport général*, thème 3. 1<sup>er</sup> Congrès de mécanique des roches, Lisbonne.
- [6] SCHNEIDER : Thèse. Grenoble, 1967 (à paraître chez Dunod).
- [7] CALOI : La Geofisica e le grandi Dighe. *L'Energia Elettrica*, 1962, n° 1.
- [8] HABIB, VOUILLE et AUDIBERT : *C.R.Ac.Sc.*, 10 mai 1965, p. 4909. Paris.
- [9] SELLI & TREVISAN : Caratteri e interpretazione della frana del Vaiont. *Giornale di geologia*, Bologna, Vol. XXXII, 1964, n° 1.
- [10] TERRASSA et al. : *Communication 8/21*. Congrès de Lisbonne.
- [11] ROCARD : *Le Signal du Sourcier*. Paris, 1964.