

Le carottage sismique : moyen d'étude de la fissuration des roches.

Seismic logging : a means to investigate rock fissuration.

Die seismische Kernbohrung : Untersuchungsmöglichkeiten der Felsenrisse.

J. LAKSHMANAN, Compagnie de Prospection Géophysique Française, Rueil-Malmaison France.

P. ALLARD, Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement, Les Milles - France.

RESUME :

Alors que les méthodes sismiques et classiques couramment employées ne permettent d'apprécier qu'un état de fissuration moyen d'un volume rocheux important, (plusieurs centaines de mètres cubes) la méthode de carottage sismique sur courte base, en étudiant la propagation d'ondes sismiques sur quelques dizaines de centimètres, permet de caractériser in-situ au sein même d'un massif, des volumes élémentaires de roche de quelques dizaines de décimètres cubes.

L'appareillage de mesure comporte une sonde sismique portant un système émetteur de l'onde et un ou plusieurs capteurs. Un tube cathodique permet la visualisation de signaux qui donnent une image de l'onde transmise par le terrain. La théorie de l'élasticité appliquée aux déformations dues à la propagation de l'onde sismique dans un volume élémentaire, permet à partir de mesures de temps et d'amplitudes de déformation, de calculer des vitesses de propagation, un module d'élasticité dynamique et un coefficient d'amortissement.

Un nombre important de mesures réparties convenablement permet d'une part d'établir des corrélations relativement fines avec la stratigraphie et d'autre part, de donner une appréciation statistique des caractéristiques mécaniques de la roche et du degré d'hétérogénéité d'un massif.

SUMMARY :

Though ordinarily employed classical seismic methods only allow for the evaluation of the average state of fissuration of an important mass of rock (several hundreds of cubic metres), the seismic logging method with a short base, in studying the propagation of seismic waves through

some decimetres, permits the in situ characterisation of elementary rock volumes of some cubic decimetres within the massif. The measuring system is composed of a seismic probe containing a wave emitting apparatus and one or several receivers. A cathode ray tube allows for the visualisation of signals which give a view of the waves transmitted by the ground.

From measures of time and amplitude of strain, the theory of the elasticity applied to strains induced by the propagation of the seismic waves in an elementary volume, allows for the calculation of wave velocity, dynamic elasticity modulus and damping coefficient.

A great number of correctly distributed measures allow, on one hand, for the establishment of rather good correlations with stratigraphy and, on the other hand, for the supply of a statistical estimation of the mechanical characteristics of the rock and of the degree of heterogeneity of a massif.

ZUSAMMENFASSUNG.

Während die laufend angewendeten seismische und klassische Methoden nur ein mittelmässiges Rissestadium eines umfangreichen Felsengesteins (mehrere hunderte von Kubikmetern) abzuschätzen ermöglichen, erlaubt die Methode der seismischen Kernbohrung auf kurzer Basis, unter Beobachtung der seismischen Wellenpropagierung auf etwa 50 Zentimeter, eine Charakterisierung - in situ, im Innern selbst eines Massivs - elementarer Felsvolumen in der Grösse von einigen Kubikdezimetern.

Das Messgerät ist mit einer seismischen Sonde versehen die ein Richtstrahl System trägt und einem oder mehreren Empfangsgeräten. Eine Braunsche Röhre erlaubt die Sichtbarkeit von Signalen, die ein vom Terrain übertragenes Wellenbild ergeben.

Die auf die, durch Propagierung der seismischen Welle in einem elementaren Volumen hervorgerufenen, Formveränderungen angewendete Elastizitätstheorie erlaubt, von Zeit- und Veränderungsumfangmessungen ausgehend, die Propagierungsgeschwindigkeit, ein dynamisches Elastizitätsmodul und ein Amortisierungskoeffizient zu errechnen.

Eine beträchtliche Anzahl von Messungen, gebühlich verteilt, erlaubt einerseits gute Korrelationen zur Erdschichtenbeschreibung aufzustellen und andererseits, eine statistische Abschätzung der mechanischen Charakteristiken des Felsengesteins und des Verschiedenartigkeitsgrades eines Massivs zu geben.

INTRODUCTION :

Les méthodes sismiques sont couramment employées et se montrent particulièrement adaptées à l'étude de la fissuration des roches.

La technique la plus employée depuis une dizaine d'années, pour les problèmes de génie civil est la "sismique réfraction". L'opération consiste à mesurer les temps de propagation de l'onde longitudinale de compression entre un point d'émission de l'ébranlement et des géophones disposés suivant une certaine géométrie à la surface du massif.

Les bases de mesure couramment employées ont plusieurs dizaines de mètres et peuvent même atteindre plusieurs centaines de mètres. Cette méthode permet d'évaluer avec une bonne approximation, l'état de fissuration moyen de l'ensemble d'un massif. Les possibilités de reconnaître des volumes rocheux restreints sont cependant très limitées, la sismique réfraction ayant l'inconvénient d'avoir une mauvaise focalisation,

en effet les temps de propagation mesurés correspondent aux trajectoires les plus rapides, et il est rarement possible d'indiquer avec précision la position du volume auquel affecter la vitesse que l'on vient de mesurer.

La méthode de carottage sismique se propose d'étudier la propagation des ondes sismiques sur une courte base (quelques mètres ou quelques dizaines de centimètres) au coeur même d'un massif. Ce problème a été résolu depuis longtemps dans le domaine pétrolier, mais avec les inconvénients suivants :

- coût très élevé des appareils ou des interventions des spécialistes,
- nécessité de forages en assez gros diamètre,
- nécessité de disposer de trous pleins d'eau ou de boue, ce qui est rarement possible, dans les terrains très fissurés.

Les mesures réalisées tant par la Compagnie de Prospection Géophysique Française, que par le Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement d'ALIX EN PROVENCE (Ministère de l'Équipement et du Logement) avaient donc pour les objectifs techniques :

- la mesure des caractéristiques sismiques (vitesse longitudinale tout d'abord, puis vitesse transversale et coefficient d'amortissement),
- l'utilisation de trous secs de faible diamètre.

Les résultats obtenus devaient permettre :

- La mesure in situ du module d'élasticité dynamique sur des volumes faibles, en vue de corrélations précises avec des mesures statiques,
- la connaissance continue des vitesses pour l'étude de l'état mécanique de massifs rocheux (barrages ou zones d'emprunts),
- éventuellement des corrélations stratigraphiques dans des séries calcaires monotones, ou d'autres méthodes de diagraphies restaient impuissantes.

Il n'entre pas dans l'objet de la présente communication, la description détaillée des appareillages, pour certains desquels, des brevets ont été déposés, mais plutôt de montrer, à l'aide de plusieurs exemples l'intérêt de ces mesures sismiques en forages.

PRINCIPAUX DISPOSITIFS :

Nous distinguerons les méthodes globales et le carottage sismique proprement dit. La "Méthode Globale" consiste à placer dans le forage, 2 ou plusieurs capteurs espacés d'une distance pouvant varier de 0,50 m. à 10 m., d'émettre un ébranlement (choc ou explosion) en surface. Les capteurs sont déplacés et l'ébranlement répété autant de fois qu'il est nécessaire; l'avantage de la méthode est sa rapidité; les inconvénients sont son manque de finesse, et également son inexactitude; (si l'on ne peut réaliser un tir en fond de trou permettant une corrélation avec les tirs "direct" et "inverse") lorsqu'il existe une importante variation latérale de vitesse.

Ces inconvénients disparaissent pratiquement, lorsque le point d'ébranlement est situé à une distance faible et constante des capteurs, ce qui est le cas pour les dispositifs de carottage sismique en courtes bases, où l'on déplace dans un forage un "sondage sismique" qui porte la source de l'ébranlement et un ou plusieurs capteurs. Ces capteurs transmettent un signal électrique visualisé par l'intermédiaire d'un oscilloscope. Pour une position de la sonde dans le forage, on peut considérer que le volume rocheux prospecté, correspond à un demi-cylindre

dont la hauteur est égale à la base de mesure (distance entre émetteur et capteur) et le rayon égal au tiers de la base ; ainsi pour une base de 60 cm, le volume unitaire prospecté peut s'étendre à environ 40 cm de la paroi du forage. En première approximation, nous considérons ce volume comme un milieu élastique homogène et isotrope; cette hypothèse nous permet de définir :

- un module d'élasticité dynamique Ed,
- un coefficient de POISSON.

Ces deux caractéristiques se déduisent des vitesses des ondes longitudinales, et des ondes de cisaillement par les relations :

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v_c^2}{v_l^2 - v_c^2} \right)$$

$$Ed = \rho v_l^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \qquad Ed = 2v_c^2 (1+\nu)$$

où ρ est la masse volumique du matériau.

D'autre part, on considère que la propagation de l'onde se fait suivant un front sphérique. Lorsque la surface d'onde arrive à un capteur celui ci transmet un signal (tension électrique) dont l'amplitude mesurée sur l'écran cathodique est de la forme :

$$A = \frac{K}{X} e^{-\alpha X} \qquad \text{ou}$$

K est un coefficient de proportionnalité,

X est la distance qui sépare le capteur du point d'émission de l'onde,

α est le coefficient d'amortissement.

Si nous considérons une sonde équipée de 2 capteurs M et N distants du point d'émission respectivement de XM et XN, les mesures des amplitudes d'un même train d'onde sur les 2 signaux transmis, permettent de calculer le coefficient d'amortissement suivant la relation :

$$\alpha = \frac{1}{XM - XN} \log \frac{AM \cdot XM}{AN \cdot XN}$$

Les mesures de carottage sismique avec une sonde portant 2 capteurs permettent donc, de déterminer, dans la mesure où les ondes longitudinales et les ondes transversales peuvent être différenciées :

- une vitesse de propagation des ondes longitudinales de compression,
- une vitesse de propagation des ondes transversales de cisaillement,
- un coefficient de POISSON,
- un module d'élasticité dynamique,
- un coefficient d'amortissement.

Il est souhaitable de déterminer l'ensemble de ces paramètres. En effet, de nombreuses mesures sismiques in situ, le long ou entre galeries (cas où l'identification des arrivées transversales peut se faire sans ambiguïté, voir Fig. 1) ont montré que le coefficient de POISSON dynamique prenait alors des valeurs généralement très élevées (0,35 à 0,45) pouvant se rapprocher du maximum théorique 0,5.

Si l'on pose : $\nu = 0,5 - \epsilon$

$$\text{On a alors} \quad : \quad v_l \approx 0,57 \sqrt{\frac{Ed}{\epsilon \rho}} \quad \text{et} \quad v_c \approx 0,86 \sqrt{\frac{Ed}{\epsilon}}$$

La vitesse longitudinale devient essentiellement fonction du coefficient de POISSON, alors que la vitesse transversale tend à devenir proportionnelle à la racine du module de YOUNG.

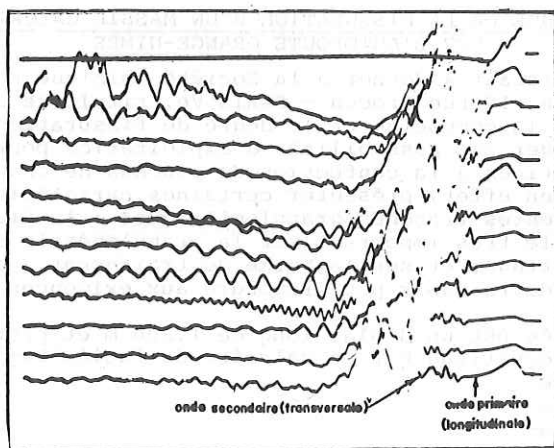


Fig. 1

Ce résultat est illustré par la Fig. 2 abaque due au Service Géologique et Géotechnique de l'Electricité de FRANCE ; on voit sur cet abaque, que pour $\nu > 0,3$ le module est pratiquement fonction de V_t et est indépendant de V_l .

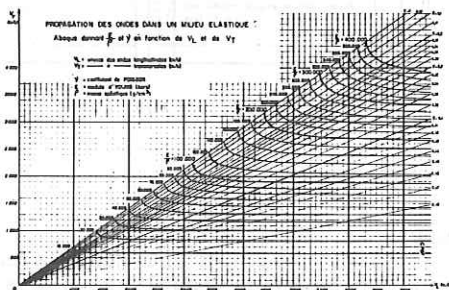


Figure 2

ETUDE DE LA FISSURATION D'UN MASSIF CALCAIRE
SUR L'AUTOROUTE ORANGE-NIMES

Cette étude consistait à donner à la Société Chimique Routière et d'En treprise Générale, 19 rue Brocca 7 PARIS Ve, titulaire des travaux, une appréciation sur la compacité et le degré de fissuration d'un massif calcaire pour juger des possibilités d'exploitation pour l'élaboration de granulats destinés à la confection de couches de chaussées. Ces ma tériaux doivent en effet, présenter certaines caractéristiques mécani ques dans différentes tranches granulométriques ; la fissuration de la roche joue un rôle très important sur la granulométrie et la qualité du matériau à l'abattage, et sur la forme de traitement (concassages et criblages qu'il devra subir pour répondre aux exigences des cahiers de prescriptions.

La zone prospectée est un déblai long de 1.200 m et profond de 6 à 20m dans un plateau constitué par un calcaire du faciès Urgonien.

La reconnaissance comportait d'une part des diagra phies de radioac tivité naturelle dans 49 forages au wagon-drill, afin de mettre en évi dence d'éventuel les pollutions arg ileuses et d'autre part, des mesures sismiques sur lon gues bases (10 à 150 m.) et des mesu res de vitesse de propagation des ondes longitudina les en carottage sismiques sur cour tes bases dans 17 forages. Trois sites ont enfin été retenus pour l'im plantation de 3 sondages carottés d'étalonnage des différentes mesu res. (Fig. 3).

LA TECHNIQUE DE MESURE

La chaîne de mesure utilisée comporte une sonde sismique déplacée dans le forage, et un oscilloscope pour visualiser les signaux. La pointe d'émission qui transmet le choc au terrain, renferme un système de dé clenchement du balayage de l'oscilloscope. Une synchronisation permet ainsi de retenir l'instant zéro d'émission de l'onde. La tête de détec tion renferme deux céramiques ferro-électriques polarisées ; la ten sion électrique variable qui apparaît aux bornes de celles - ci est

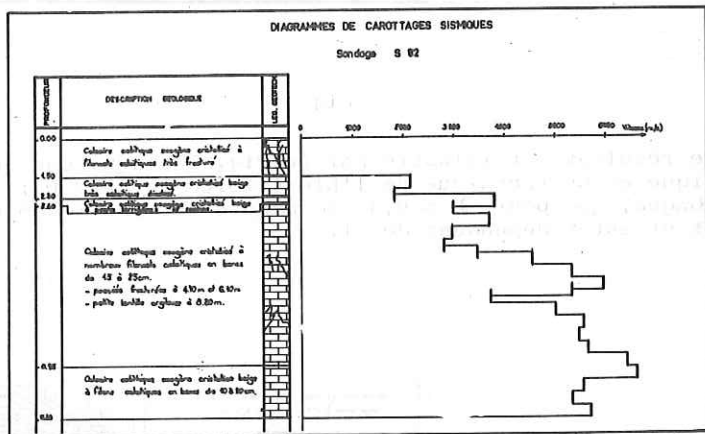


Fig. 3

transmise à l'amplificateur vertical de l'oscilloscope. La vitesse de balayage utilisée pour la base de temps est de 20 s/cm. Dans le cas de l'étude présentée, la base de mesure est de 60 cm. Les stations de mesures sont effectuées en déplaçant chaque fois la sonde de 50 cm, on garde ainsi un chevauchement de 10 cm entre 2 mesures successives, afin de ne pas sauter des fissures localisées au voisinage des têtes. Des mesures intermédiaires ont été effectuées quand les valeurs de vitesses obtenues montrent des variations importantes. La tête d'émission et la tête de détection de la sonde, sont alignées suivant une même génératrice du forage.

RESULTATS DES MESURES

L'analyse des résultats obtenus permet de faire les observations suivantes sur les différentes méthodes mises en oeuvre

- le carottage sismique met en évidence une grande hétérogénéité dans l'état de fissuration de la roche.

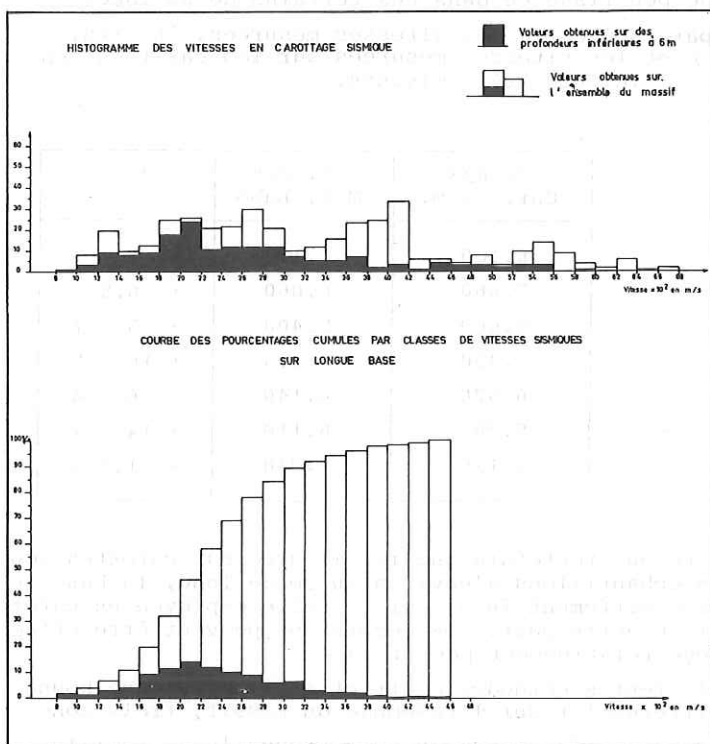


Fig. 4

Trois familles peuvent être différenciées sur une gamme étendue de vitesses (Fig. 4) :

800 à 3000 m/s - 3000 à 4600 m/s - 4600 à 6800 m/s

Les mesures sismiques effectuées sur de grandes bases (10 à 120 mètres) ne permettent pas d'apprécier a priori l'hétérogénéité dans l'état de fissuration, nous trouvons en effet une seule famille de vitesses bien groupées autour de la valeur moyenne 2200 m/s (Fig. 4) .

- une zone superficielle est nettement mise en évidence tant par les logs de radioactivité que par des graphiques de carottage sismique sur une épaisseur très voisine de 6 mètres pour l'ensemble du massif. L'histogramme correspondant permet de bien caractériser ces terrains de surface (Fig. 4) avec 70 % des valeurs dans la première famille de vitesses définie précédemment. Quelques vitesses élevées (10 % des valeurs sont supérieures à 4200 m/s) montrent l'existence de roche peu fissurée dans ces terrains de surface.
- la comparaison entre les vitesses mesurées, in situ, en carottage sismique et les vitesses mesurées sur les carottes en laboratoire montre des valeurs très voisines.

V. m/s Car. sism.	V. m/s Mes. Labo	+ - %
6.180	6.120	- 1 %
5.660	6.060	+ 6,8 %
5.660	5.400	- 5 %
5.350	6.310	+ 16 %
6.520	6.140	- 6 %
5.260	6.110	+ 14 %
6.120	6.030	- 1,4 %

Nous noterons toutefois que les mesures sur carottes sont effectuées sur des échantillons d'environ 20 cm de long, la base de mesure est donc très nettement inférieure à celle employée en carottage sismique (60 cm). D'autre part, ces mesures ne peuvent être effectuées que sur une roche relativement peu fissurée.

- Les différentes méthodes montrent entre elles une bonne corrélation pour différencier sur l'ensemble du massif, trois zones (Fig. 5) :
 - . une zone peu fracturée où on retrouve les 3 familles de vitesses différenciées sur l'ensemble du massif. Notons toutefois que près de 50 % des valeurs sont supérieures à 4600 m/s.

une zone fracturée où la famille de vitesses élevées est représentée par moins de 10 % des valeurs alors que les vitesses inférieures à 3200 m/s représentent près de 65 % des valeurs.

une zone de calcite : il s'agit d'un accident lithologique et non d'une zone différenciée en fonction de l'état de fissuration de la roche. Les corrélations établies dans cette zone à partir d'un sondage carotté montrent une radioactivité relativement faible, et un diagramme de carottage sismique très dentelé avec des valeurs très souvent comprises entre 1200 et 4200 m/s, ce qui représente une originalité par rapport aux autres diagrammes (sondage S 82 par exemple).

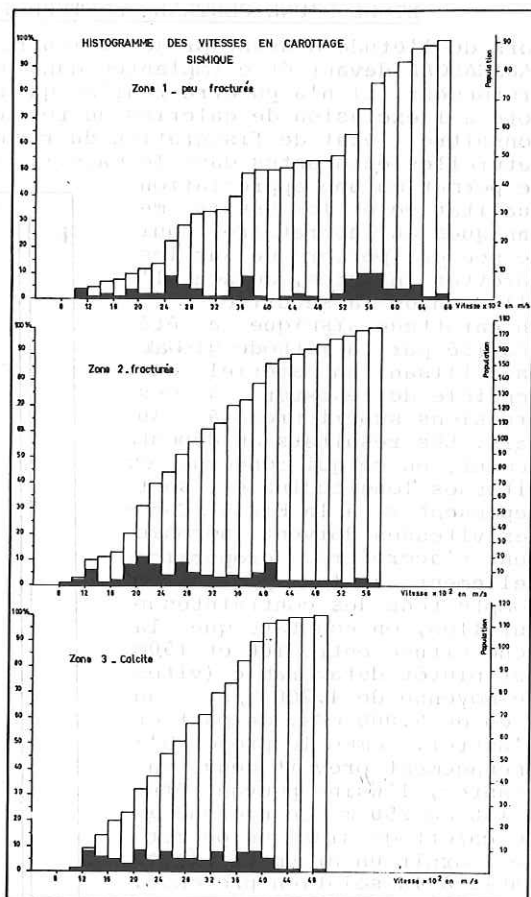


Fig. 5

CONCLUSION

La méthode de carottage sismique permet de très bonnes corrélations avec les autres méthodes d'investigation. Elle permet de caractériser plus finement et quantitativement l'état de fissuration d'un massif rocheux.

ETUDE D'UNE CENTRALE SOUTERRAINE A GRANDE PROFONDEUR

Lors de l'étude d'avant projet sommaire, une centrale souterraine à MADAGASCAR devant être implantée dans des amphibolites, à 250 m de profondeur, il n'a pu être réalisé qu'un seul sondage atteignant cette cote à l'exclusion de galeries de reconnaissance ; il s'agissait de connaître l'état de fissuration du rocher, ainsi que les contraintes naturelles existantes dans le massif. Or, l'observation des carottes ne permet qu'une appréciation qualitative et les essais mécaniques au laboratoire, qui ne peuvent porter que sur les carottes intactes, donnent l'illusion de la sécurité.

Un carottage sismique a été réalisé par la méthode globale en utilisant un matériel susceptible de résister à des pressions supérieures à 30 bars. Les résultats du dépouillement, en ce qui concerne les vitesses longitudinales, sont représentés à la Fig. 6. Comme les vitesses doivent normalement s'accroître, proportionnellement à la profondeur compte tenu des contraintes naturelles, on constate que la zone située entre 100 et 150 m est plutôt défavorable (vitesse moyenne de 4.200 m/s. au lieu de 5.000 m/s. de part et d'autre). Comme le projet d'aménagement prévoit deux variantes, l'usine pouvant être à 150 ou 250 m. de profondeur le carottage sismique permet de fournir un argument favorable à la solution profonde. Signalons enfin que des essais sont en cours, pour estimer l'état des contraintes par la mesure de vitesses sur échantillons pendant leur chargement ; on poussera le chargement jusqu'à retrouver la vitesse mesurée in situ par carottage sismique. On pourra alors espérer apprécier, l'ordre de grandeur des contraintes, in situ du massif.

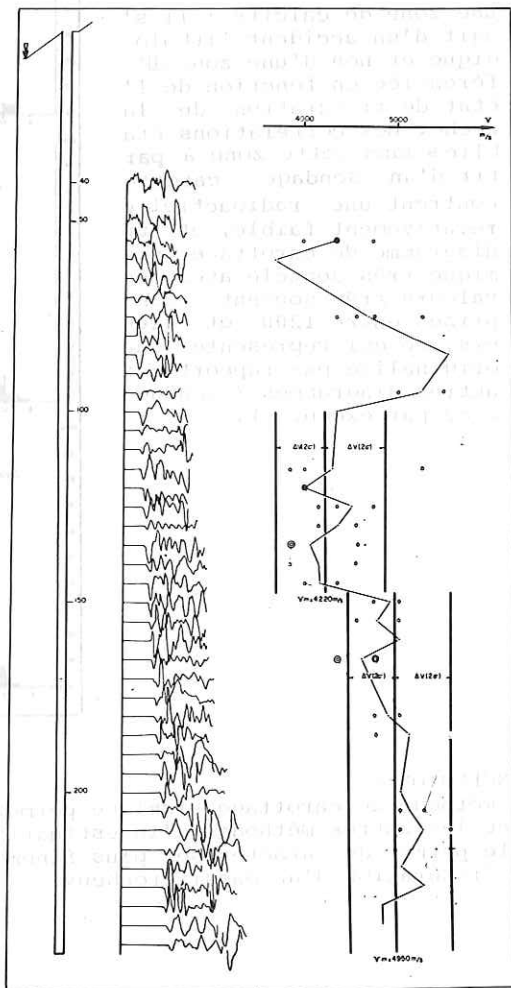


Fig. 6

ESSAIS DE MESURE DE L'ENSEMBLE DES CARACTERISTIQUES SISMQUES
DANS UNE SERIE MARNO CALCAIRE

L'exemple suivant concerne un carottage sismique dans une série marno-calcaire où il a été possible d'apprécier, outre les vitesses longitudinales, les vitesses transversales et les coefficients d'amortissement. Comme dans l'ensemble des mesures simples, en galerie ou en forage, il apparaît ici une arrivée secondaire énergétique compabliblé avec l'hypothèse d'une onde transversale. Afin de réduire l'imprécision, les temps secondaires sont mesurés sur des pics. Les logs de vitesse de notre exemple (voir Fig. 7) sont assez peu contrastés, à l'exception d'un banc à vitesse longitudinale, très élevée (3.800 m/s). Par contre, les modules d'élasticité calculés suivent très fidèlement les variations lithologiques. Ces variations sont également bien traduites par le coefficient d'amortissement.

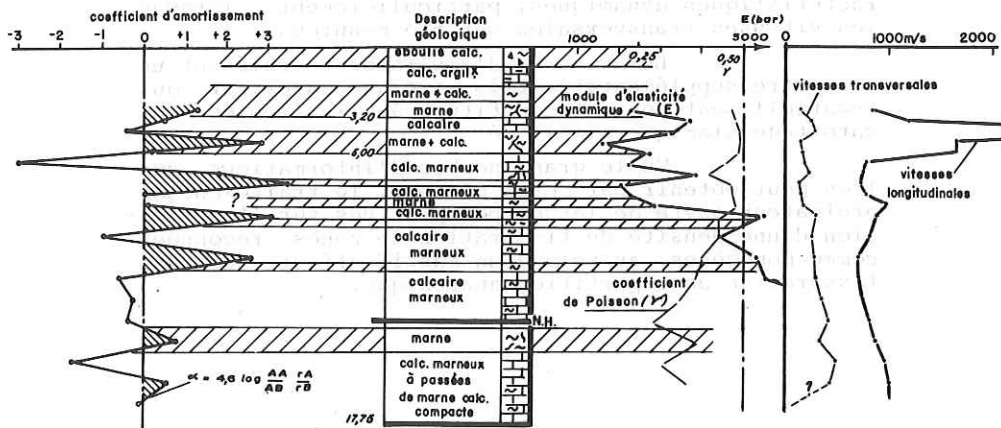


Fig. 7

CONCLUSION

Dans le cadre de l'étude générale d'un massif rocheux, le carottage sismique permet une estimation statistique relativement précise de l'état de fissuration de la roche.

Cette méthode consiste en fait à caractériser par leur vitesse sismique, un certain nombre d'échantillons en place, représentatifs de l'ensemble du volume.

Cette technique est économiquement avantageuse puisqu'elle permet un mode de foration par destruction, quatre à six fois moins cher que la foration en carottage continu.

Dans le cas d'une étude des fondations d'un barrage ou autre grand ouvrage, le carottage sismique peut permettre des corrélations bien localisées et objectives entre des mesures statiques, et les caractéristiques dynamiques, particulièrement lorsque les vitesses transversales ont été mesurées.

Les mesures d'amplitude fournissent un paramètre supplémentaire très aisé à mesurer, et qui éventuellement peuvent constituer à elles seules un carottage sismique simplifié.

Vu le grand nombre d'informations que l'on peut obtenir par cette méthode, le traitement par ordinateur ouvre de larges perspectives sur l'estimation d'une densité de fissuration de zones reconnues comme homogènes, au sein d'un massif affecté par une fissuration de répartition anarchique.