

P6

Analyse des amplitudes des ondes élastiques en vue de la détection des variations de contraintes dans les milieux fissurés

Analysis of seismic amplitudes for detecting stress changes in jointed rock media

Amplitudenanalyse der elastischen Wellen in Hinsicht auf die Detektion von Verformungsänderungen in zerklüfteten Media

J. P. DAGNAUX, J. LAKSHMANAN

Compagnie de Prospection Géophysique Française - Direction Régionale Nord

J. C. GARNIER

Electricité de France - Direction de l'Équipement

Résumé

Les auteurs présentent des essais expérimentaux visant à jauger la sensibilité et la fidélité des mesures d'amplitude d'ondes élastiques, créées dans un milieu rocheux par un dispositif de choc taré reproductible. Une première étude en laboratoire a prouvé l'extrême sensibilité de la méthode appliquée à l'auscultation d'un massif de béton soumis à une rupture en traction. Les écarts d'amplitude notés atteignent 60 %. Dans un second temps le même appareillage a permis de suivre l'évolution de signaux sismiques au cours d'un essai au vérin plat à la paroi d'une galerie. On a alors enregistré des variations d'amplitude de 30 % sur des bases de mesures n'ayant accusé que 1 % d'écart sur leur longueur sous 50 bars de pression.

Summary

The authors present experimentation intended to test accuracy of measurement of seismic amplitudes, using a shock of constant intensity. A first laboratory experiment proved the great sensitivity of the method applied to the investigation of a concrete block during failure by tension. Amplitude variation reached 60 %.

During a second experiment, the same apparatus was used to follow variation of seismic signals during a flat jack test in a tunnel. The variation of seismic amplitude reached 30 %, while measured strain was only of 1 % under 50 bars, along the same measurement line.

Zusammenfassung

Die Verfasser beschreiben ein Verfahren um die Genauigkeit bei der Messung von seismischen Amplituden überprüfen zu können, mit Hilfe einer Erschütterung von gleichbleibender Intensität. Eine erste Laboratoriumsuntersuchung zeigt, die grosse Empfindlichkeit dieses Verfahrens, bei der Prüfung eines Betonblockes während des Zugbruchs. Die Amplitudenschwankung betrug 60 %.

In einer zweiten Untersuchung wurde derselbe Apparat verwendet um die Schwankung von seismischen Zeichen während eines Flachplattenversuches in einem Tunnel zu ermitteln. Die Schwankung der seismischen Amplitude betrug 30 %, während die gemessene Verformung nur 1 % unter 50 bars längs derselben Messungslinie aufzeigte.

Introduction

L'influence de l'état de contrainte et de compacité d'un milieu discontinu sur la propagation des ondes élastiques en son sein est un fait bien connu, déjà largement étudié. Les essais sur échantillons de roche ou de sable soumis à des contraintes élevées [3] montrent des variations notables des vitesses de propagation. Les mesures dynamiques « in situ » réalisées sur des fondations de barrage [6], ou à la paroi d'une galerie sous un vérin plat [4] révèlent également une relation entre les caractéristiques dynamiques du rocher et les charges qui lui sont appliquées.

Mais les auteurs qui ont développé les méthodes dynamiques d'auscultation dans le temps n'ont semble-t-il, utilisé jusqu'à présent que des variations de célérités. Or l'amplitude des ondes sismiques est également très sensible aux variations de contraintes. Cela a été constaté sur des sols [1]. Il nous a paru intéressant d'analyser de la même façon la relation entre amplitude et contrainte dans le béton et dans les roches.

Dans ce but nous avons procédé à des mesures expérimentales sur un massif de béton, puis à la paroi d'une galerie. Dans les deux cas, les contraintes variables étaient fournies par des vérins plats Freyssinet noyés dans le béton ou scellés dans des saignées découpées dans le rocher.

I. Méthode de mesure. Appareillage utilisé

On transmet un choc d'intensité constante au massif étudié à l'aide d'un système simple de masse pendulaire tombant d'une hauteur calibrée sur des plots métalliques scellés dans le matériau à des emplacements et distancés déterminés. Les vibrations émises sont reçues par des sismographes électromagnétiques HS-J-Geospace fournissant une tension proportionnelle à la vitesse de déplacement particulière, dont nous enregistrons en fait l'amplitude.

L'enregistrement a lieu sur un oscillographe Textronix à écran rémanent permettant un excellent contrôle

visuel de la qualité des signaux avant de les photographier.

Une description plus complète de ce même appareillage figure dans le rapport [2] sur l'auscultation sismique du barrage de la Gage II — on voudra bien s'y reporter.

Toutefois dans notre montage, le système de déclenchement de la base de temps diffère. Il s'obtient par la fermeture d'un circuit électrique, passant par la terre, dès que la massette d'émission du choc vient frapper un plot. Ce système offre une très grande sensibilité de déclenchement et une excellente précision. Nous avons vérifié, par la expérience sur une barre métallique, qu'il introduit un décalage constant à l'origine des temps inférieur à $10 \mu\text{s}$. Sa fidélité et sa stabilité sont amplement démontrées sur les photographies où nous avons enregistré plusieurs signaux par répétition du même choc dans les mêmes conditions. On trouvera sur la fig. 1 la reproduction d'une de ces photos.

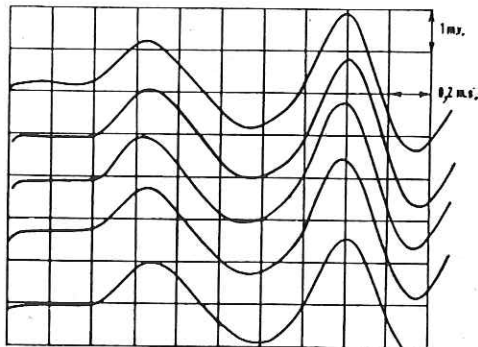


FIG. 1. Exemple de fidélité de reproduction des signaux obtenus par répétition du même choc

Le constructeur garantit une précision de 3 % sur les vitesses de balayage, et de 5 % sur les amplitudes.

II. Expériences en laboratoire sur un massif de béton

II.1. Dispositif expérimental

Il s'agit d'un massif de béton de 3 m^3 coulé dans une fosse en rez-de-chaussée du laboratoire d'essai de la Compagnie de Prospection Géophysique Française. Deux vérins plats avaient été noyés dans le béton. Un capteur sismique et des plots métalliques ont été scellés ensuite à sa surface suivant la disposition que l'on peut voir sur la fig. 2.

Ces plots alignés suivant AB constituent un dispositif microsismique situé tout entier dans une zone comprimée; alors que le trajet sismique PC traverse une zone tendue.

Après une série de mesures à pression nulle dans les vérins, nous avons fait varier celle-ci afin de suivre les éventuelles modifications dans la propagation des ondes.

II.2. Zone comprimée

En émettant les chocs sur la ligne de plots AB nous avons établi des diagrammes espace-temps et distance-amplitude.

Les premières fournissent la vitesse de propagation des ondes longitudinales: 3.800 m/s. sans contrainte, 4.030 m/s. sous une pression de 20 bars dans les vérins.

L'écart relatif est alors de 6 %.

Nous signalons ici la difficulté rencontrée pour pointer la réelle première arrivée d'énergie, qui se présente sous la forme d'un départ positif du spot de très faible amplitude. Cela se voit bien sur la fig. 6 relative aux essais sur rocher. Le mode d'émission de l'ébranlement par le choc d'une masse engendre en effet surtout des ondes de cisaillement; et des calculs théoriques ont montré [5] que dans ce cas, 7 % seulement de l'énergie rayonne sous forme d'ondes longitudinales.

Aussi les amplitudes que nous avons mesurées tout au long de nos expériences sont elles imputables surtout à des ondes transversales. Sur l'alignement AB elles n'ont pas varié de façon significative avec la pression dans les vérins.

II.3. Zone tendue

En faisant jouer uniquement le vérin de droite sur la fig. 2, nous avons analysé les signaux reçus par le capteur C après que l'onde ait parcouru le trajet PC. Pour une augmentation de la pression de 15 bars, le temps de parcours s'allonge de $10 \mu\text{s}$ ce qui correspond à une diminution de la vitesse de propagation de 7 %. Les amplitudes, tout en fluctuant, décroissent aussi légèrement, mais l'écart, entre 0 et 20 bars, n'est que de 2 %.

Nous avons alors poursuivi l'expérience jusqu'à obtenir la rupture du béton en traction. Une fissure est apparue en surface au droit du vérin, et simultanément l'amplitude de l'oscillogramme a chuté de façon spectaculaire, comme on peut le voir sur la fig. 3 où sont enregistrés les signaux avant et après rupture.

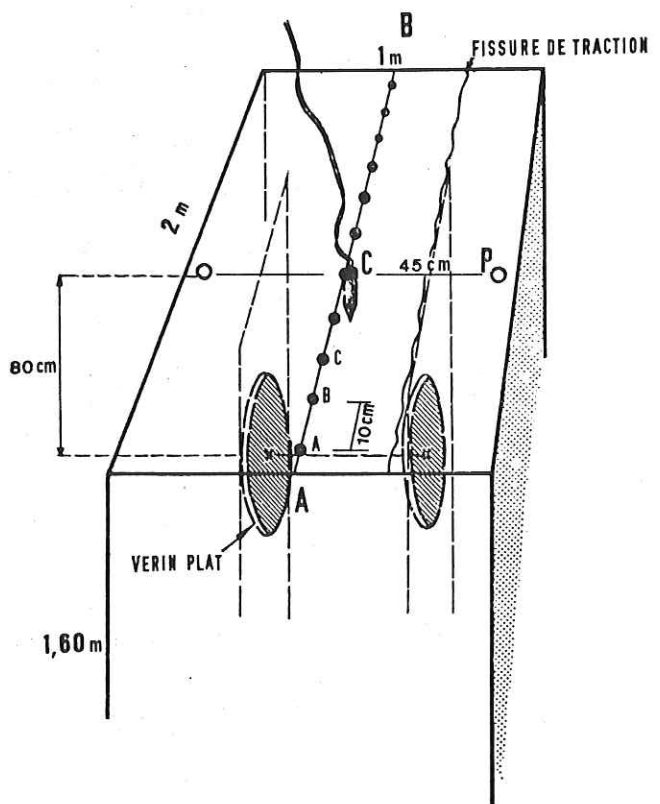


FIG. 2. Dispositif expérimental sur le bloc de béton

Ayant ramené la pression à zéro, par paliers, nous l'avons ensuite fait varier suivant des cycles. Les valeurs de l'amplitude mesurées à chaque palier ont été portées sur le graphique de la fig. 4.

Contrairement à ce qui se passait jusque là pour le béton intact, nous avons assisté à des variations importantes de l'amplitude du signal atteignant 60 %.

En surface l'ouverture de la fissure s'est manifestée suivant toute la longueur du massif, et son aspect a varié d'une ligne à peine perceptible à pression nulle, à un écartement des bords de 1 à 2 mm. aux pressions maximales.

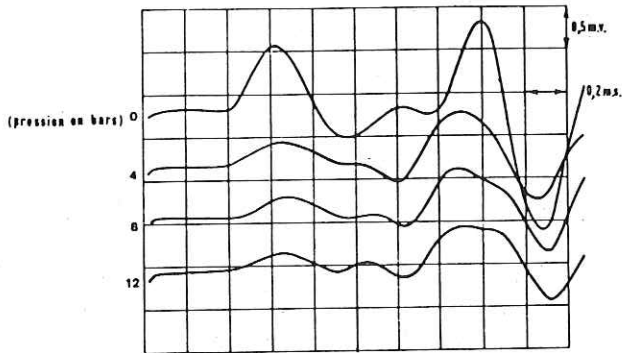


FIG. 3. Variation de l'amplitude avec la pression du vérin exerçant la traction dans le bloc de béton

Sur la fig. 4 on remarque un phénomène qui tient sans doute aux conditions locales d'expérience (position

du vérin...): les amplitudes, après avoir diminué normalement jusqu'à 12 bars, se remettent à croître légèrement au delà de cette valeur. Le même phénomène se reproduit en sens inverse à la descente. La réversibilité des derniers cycles est presque parfaite.

L'analyse des temps de phase, c'est-à-dire le pointage de tous les pics et les creux de signal, montre qu'ils varient aussi. Mais les écarts sont assez faibles donc peu intéressants.

A la lumière de ce premier essai la méthode des mesures dynamique d'amplitude apparaissait très prometteuse. Il convenait ensuite de l'expérimenter sur le rocher.

III. Mesures en galerie

Des mesures du même type ont été faites « in situ » dans la galerie de reconnaissance de la future centrale souterraine de Sisteron (vallée de la Durance à l'aval de Serre-Ponçon) à l'occasion d'essais au vérin plat (*).

La roche, à cet endroit, est une marne noire, à teneur en carbonates peu élevée (35 à 40 %) d'aspect homogène, mais formée en réalité d'une succession de varves très fines alternativement plus claires et plus foncées. Les principales discontinuités sont parallèles à la stratification. Le pendage très régulier au niveau de la galerie est de l'ordre de 65°.

(*) Parmi les nombreux essais géotechniques réalisés dans cette galerie signalons les essais de cisaillement in-situ sur blocs de 60 cm. d'arête, qui font l'objet de la communication de MM. Comes et Fournier.

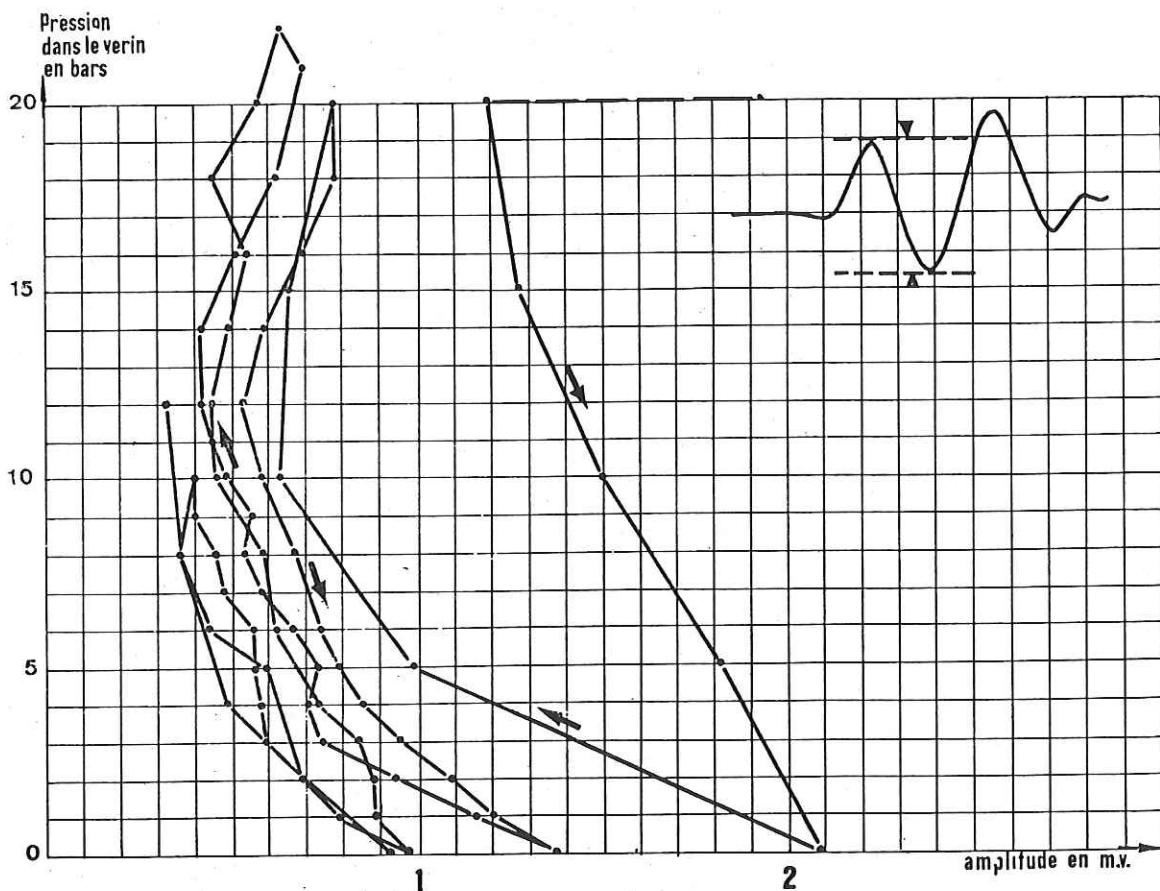


FIG. 4. Variation de l'amplitude suivant les cycles de pression effectués dans le vérin exerçant la traction dans le bloc de béton

III.1. Dispositif de mesure

Plusieurs rameaux en travers bane avaient été creusés spécialement à partir de la galerie principale pour la réalisation d'essais géotechniques.

Les mesures dynamiques ont eu lieu à la paroi d'un de ces rameaux sur l'emplacement d'un double essai au vérin plat qui avait servi à la mesure horizontale et verticale de la contrainte naturelle et du module du rocher.

Le capteur et les points d'émission étaient placés dans la zone d'influence commune aux deux vérins. Nous avons pu ainsi faire varier l'état de contrainte dans le rocher et suivre l'évolution des amplitudes suivant une base horizontale et une base verticale.

La figure 5 montre un schéma de l'installation.

Les deux bases de mesures dynamiques sont adjacentes aux bases extensométriques de 200 mm. (avec un léger décalage prévu pour ne pas gêner la mise en oeuvre du dilatomètre L'Hermite-Meynier).

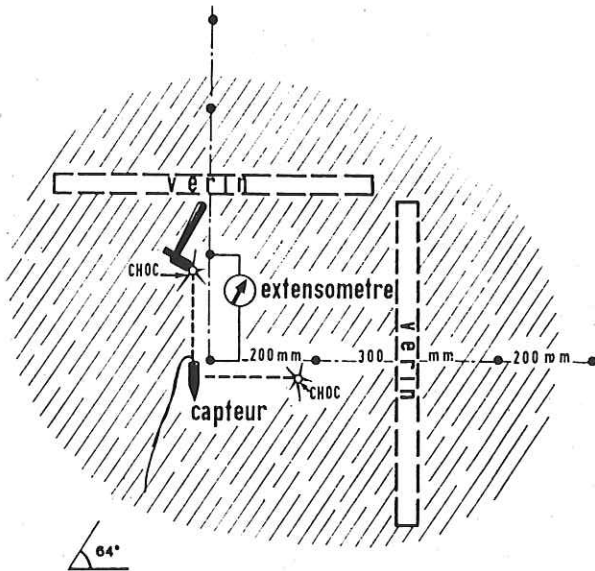


Fig. 5. Dispositif de mesures dynamiques et extensométriques sur l'essai aux vérins plats en galerie

Le capteur est fixé solidement au rocher par un ancrage à expansion du type Rawl et un collier de serrage. Les chocs sont émis sur des plots scellés. Le dispositif de frappe, accroché au parement, reste invariable pendant toute la durée de l'essai.

On réalise des cycles de charge de 0 à 50 bars sur chaque vérin successivement, l'autre ayant été calé initialement à la contrainte naturelle déterminée auparavant (soit 16 bars horizontalement, et 24 bars verticalement). Les mesures dynamiques sont effectuées sur la base perpendiculaire au vérin mis en oeuvre. L'amplitude est évaluée entre le premier creux du signal et le pic suivant.

III.2. Résultats

Comme on peut le voir sur la fig. 6, les signaux conservent leur forme d'un palier de pression à l'autre. On voit

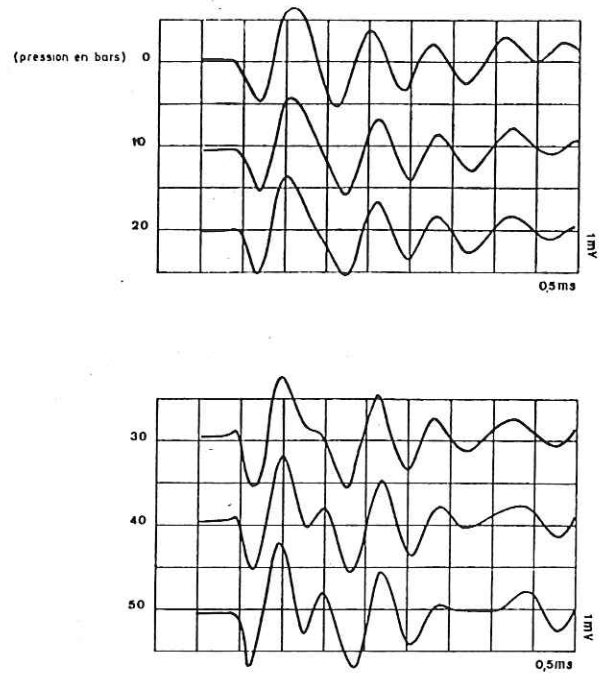


Fig. 6. Evolution des amplitudes sur la base horizontale avec la pression exercée dans le vérin vertical

seulement apparaître sur les oscillogrammes relatifs à la base horizontale, une modulation qui s'accroît avec la pression, alors qu'une phase analogue s'atténue sur le signal relatif à la base verticale.

Les courbes pression-amplitude de la fig. 7 mettent en évidence deux résultats remarquables:

1) Sur la base horizontale l'amplitude croît avec la pression tandis qu'on note une évolution inverse sur la base verticale.

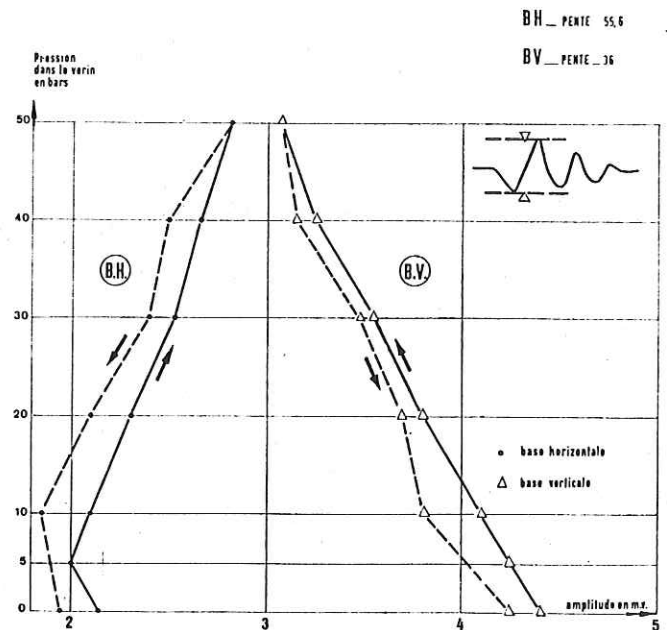


Fig. 7. Variation de l'amplitude sur chaque base avec la pression dans le vérin correspondant

2) Dans un cas comme dans l'autre, la loi de variation est quasiment linéaire.

Les graphiques de la fig. 8 font apparaître de la même façon une relation sensiblement linéaire entre les amplitudes et les déformations des bases extensométriques.

Les variations horizontale et verticale de l'amplitude atteignent toutes deux 30 % pour un raccourcissement voisin de 1 ‰ en valeur relative (230 microns horizontalement et 200 microns verticalement).

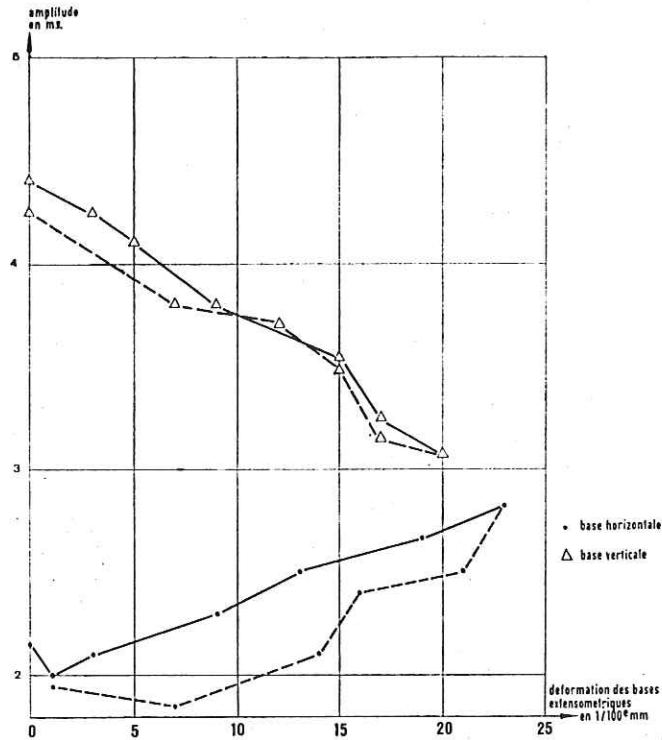


FIG. 8. Corrélation entre amplitude et déformation mesurée à l'extensomètre sur chaque base

Il est curieux de noter une baisse d'amplitude sur la base verticale quand la pression augmente dans la vérin horizontal. On peut voir là un effet de l'anisotropie de structure de la roche dont le pendage et la schistosité sont inclinés de 64° sur l'horizontale. L'effort vertical provoquerait un desserrement des lits par flambage d'où la perte d'amplitude, tandis que l'effort horizontal les comprime en augmentant la compacité du roche. L'accen-

tuation (ou l'atténuation) d'une modulation du signal, indiquée plus haut, relève probablement du même phénomène.

Conclusion

Les expériences ci-dessus ont montré la sensibilité et la fidélité des mesures d'amplitudes d'ondes élastiques.

L'ampleur des variations atteint 60 % dans le béton pendant l'ouverture d'une fissure de traction, et 30 % dans le rocher de Sisteron sous 50 bars de compression.

Ainsi les mesures dynamiques d'amplitude, complétant les mesures de célérités, sont susceptibles de fournir de précieux renseignements sur l'état mécanique des milieux discontinus.

Elles constituent notamment un moyen sensible de détection des variations de contrainte dans les massifs rocheux. Elles peuvent donc être utilisées pour l'auscultation dans le temps des massifs de fondation ou des cavités souterraines.

Une application est donnée dans le rapport [2] sur l'auscultation sismique du barrage du Gage II.

Nous pensons que la poursuite d'études dans ce domaine conduira à une meilleure exploitation des méthodes dynamiques, en les rattachant de façon plus précise aux conditions de contrainte et de déformation des massifs rocheux.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. P. DAGNAUX.—*Contribution à l'étude de la propagation des ondes dans les sols*. Thèse de Doctorat de Spécialité. Faculté des Sciences, Grenoble, 1968.
- [2] G. FAUROUX, J. C. GARNIER et J. LAKHSMANAN.—*Observation des variations de contrainte dans le rocher de fondation du barrage du GAGE II par auscultation dynamique*. Symposium international de Mécanique des Roches de Madrid, 1968.
- [3] P. HABIB, G. VOUILLE et AUDIBERT.—*Variation de la vitesse du son dans les roches et les sables soumis à des contraintes élevées*. Compte rendu Académie des Sciences de Paris. Tome 260, 10 Mai, 1965.
- [4] B. KUJUNDZIC.—*A contribution to the investigation of the pressure grouting effect on consolidation of rock masses*. Premier Congrès de la Société Internationale de Mécanique des Roches. Lisbonne, 1966. Rapport 8.23.
- [5] G. G. MILLER, H. PURSEY.—*On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid*. Proc. Roy. Soc. 233, 1955.
- [6] M. TERRASSA, P. DUFFAUT, J. C. GARNIER et M. F. BOLLO.—*Auscultation sismique du rocher de fondation du barrage de Roujanel*. Premier Congrès Sté Internationale de Mécanique des Roches. Lisbonne, 1966. Rapport 8.19.
- [7] J. E. WHITE.—*Seismic Waves, Radiation, Transmission and Attenuation*. Mc. Graw-Hill, 1965.