

Observation des variations de contrainte dans le rocher de fondation du barrage du Gage II par auscultation dynamique

Observation of stress variation in rock foundation by seismic prospection at the Gage II Dam

Die Beobachtung der Spannungsschwankungen im Felsboden des Gage II Dammes mit Hilfe von seismischen Untersuchungsverfahren

G. FAUROUX - J. C. GARNIER

Electricité de France

J. LAKSHIMANAN

Compagnie de Prospection Géophysique Française

Résumé

L'auscultation d'un ouvrage consiste en général à répéter dans le temps les mêmes mesures de contraintes.

Des expériences prometteuses ont été faites également depuis quelques années pour ausculter la fondation rocheuse des barrages à l'aide de la mesure des célérités d'ondes sismiques.

Au barrage du Gage II a été appliquée une méthode originale utilisant aussi la mesure des amplitudes sismiques.

A partir de la galerie de drainage, 20 capteurs sismiques ont été scellés dans des forages, et deux dispositifs de frappe constante ont été installés. Huit séries de mesures ont été réalisées avant et pendant le remplissage de la retenue.

Sur le plan technologique, les mesures ont permis de montrer la validité et l'intérêt des mesures d'amplitude réalisées à l'aide du dispositif de frappe constante.

En effet, si la variation moyenne des modules d'élasticité dynamique est de 47 %, les variations d'amplitude sont encore plus nettes, puisque l'augmentation moyenne des amplitudes est de 90 % entre la 1ère et la 4ème série.

Les variations de module ou d'amplitude sont les plus importantes suivant deux zones d'influence:

- l'une située à la verticale de l'ouvrage
- l'autre située le long du voile d'injection.

Ces zones seraient en compression lors du remplissage du barrage.

Introduction

Les constructeurs de barrages réservent traditionnellement le terme d'auscultation à la répétition des mêmes mesures dans le temps, au cours de la construction et de l'exploitation de ces ouvrages.

Les grandeurs mesurées sont en général des déformations et des déplacements.

Summary

Dam control usually consists in repeating stress and measurements. Since several years, promising experiments using repeated measurement of seismic velocity in rock foundations have also been carried out.

At the Gage II dam, a new method, using seismic amplitudes, was applied.

Twenty geophones were cemented in drill-holes drilled from the drainage gallery, and two permanent constant-shock hammers installed. Eight series of measurements were carried out, before, during and after reservoir filling.

Technically, the measurements showed the validity and interest of amplitude measurement of constant-shock signals.

Average variation of dynamic elastic modulus was of 47 % and average amplitude variation was much greater, being of 90 %.

The greatest amplitude and modulus variations were found following:

- a vertical zone under the dam,
- a line following the grout curtain.

These zones would be under compression during reservoir filling.

Zusammenfassung

Die Dammkontrolle besteht in der Regel aus der Wiederholung von Spannungsmessungen. Seit einigen Jahren werden auch vielversprechende Methoden angewandt, die in der Messung der seismischen Geschwindigkeit in Felsgesteigründungen beruhen.

Im Gage II Dam wurde ein neues Verfahren mit seismischen Amplituden benützt.

Es wurden 20 Geophone in Bohrlöcher, die vom Entwässerungsstollen aus gebohrt waren, hineingebaut. Weiterhin wurden auch zwei Dauerschlaghammer montiert eingerichtet. Es wurden acht verschiedene Messungsreihen vor, während und nach der Stausee-Einfüllung durchgeführt.

Technisch gesehen erwies sich bei diesen Messungen die Gültigkeit und die Vorteile, die die Amplitudenmessung von Dauerschlagzeichen mit sich bringt.

Die Mittelschwankung des dynamischen Elastizitätsmoduls betrug 47 %, dagegen war die der Amplitud viel grösser, d. h. 90 %.

Die grössten Amplituden- und Modulschwankungen wurden an folgenden Stellen gefunden:

- In einer senkrechten Zone unter dem Dam.
- In einer Linie entlang der Injektionsschürze.

Diese beiden Zonen würden während der Stausee-Einfüllung unter Druck liegen.

Les méthodes géophysiques, notamment sismiques, qui sont couramment utilisées pour évaluer l'effet des injections, ont également été utilisées dans quelques cas pour détecter des variations de contraintes dans les fondations rocheuses [1], [2], [3] et [4], comme cela avait été fait en laboratoire sur des échantillons de sols ou de roches [5] et [6].

Mais toutes ces expériences n'ont concerné que des

- Note -
la longueur des forages est donnée en mètres
l'inclinaison sur la verticale est donnée en grades

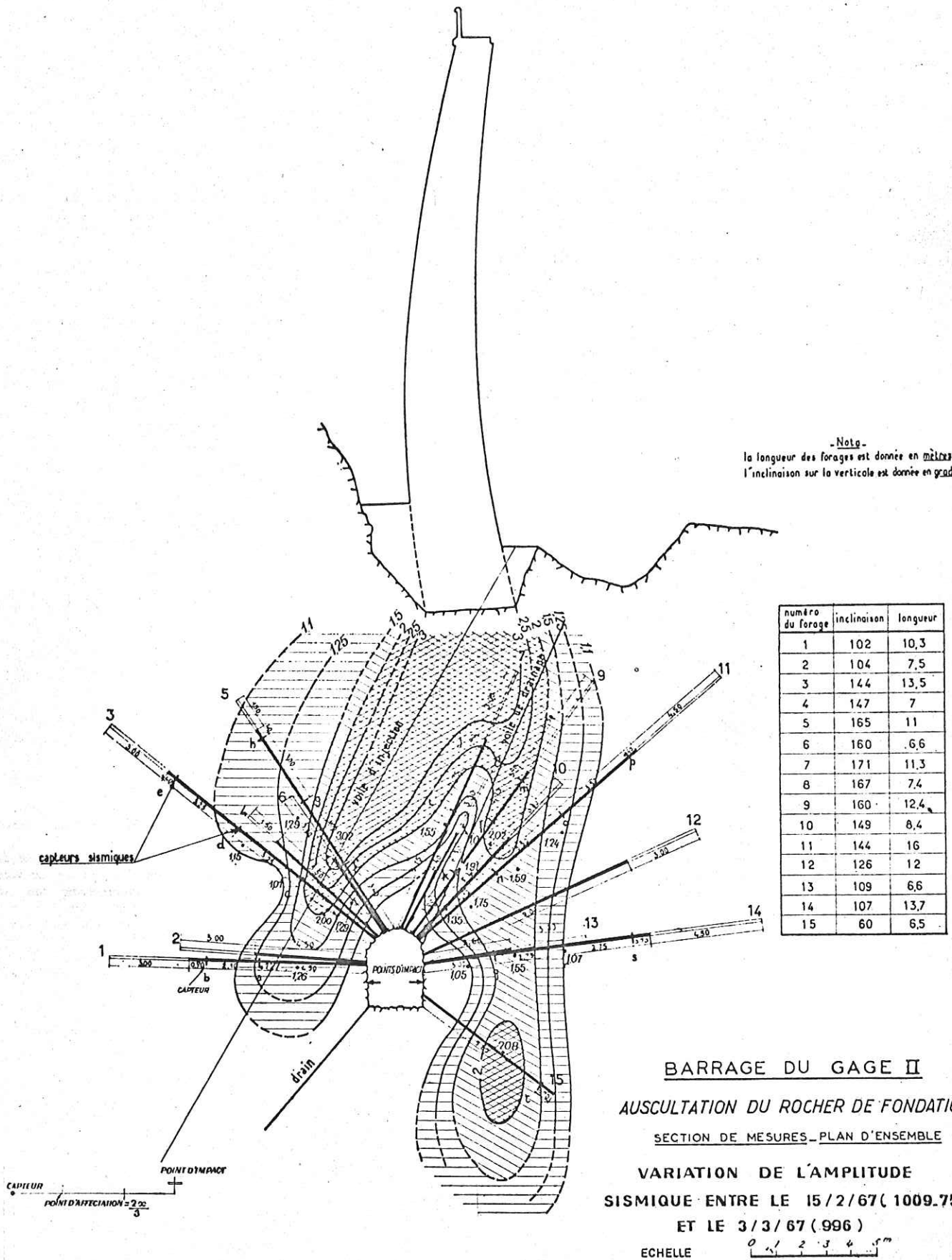


Fig. 1

mesures de célérité. Or, des études récentes [7] et [8] ont montré le parti qu'on pouvait tirer des mesures d'amplitude des ondes élastiques provoquées par des chocs constants pour l'auscultation dynamique des massifs rocheux.

La méthode des amplitudes a été appliquée pour la première fois en même temps que celle des vitesses à l'auscultation des fondations du barrage du Gage II (Chute de Montpezat, Massif Central Français) lors de sa mise en eau.

Dispositif de mesures

Le but poursuivi était de reconnaître la forme du bulbe des pressions sous l'ouvrage et d'apprécier l'importance du serrage ou du desserrage éventuel des différentes parties de la fondation.

Le dispositif mis en place comportait vingt capteurs sismiques scellés dans huit forages rayonnant à partir de la galerie de drainage (voir fig. 1). Ces forages étaient de plus équipés en piézomètres. Il a été décidé d'effectuer des mesures systématiques avant, pendant et après le remplissage.

L'énergie utilisée était fournie par des chocs d'intensité constante, créés par:

- une masse pivotante d'un poids de 7,5 kg. solidaire d'un balancier scellé dans la calotte,
- une enclume horizontale scellée dans le milieu du parement.

La masse était soulevée latéralement de 25 cm., et ensuite retombait librement.

Le point de choc amont était utilisé pour les capteurs amont («a» à «j») et le point de choc aval pour les capteurs aval («i» à «l»), les capteurs «i» et «j», situés à la verticale de la galerie, étant utilisés des deux côtés.

Une liaison permanente étanche a été réalisée entre la galerie et la salle de commande des vannes. Cette liaison a été réalisée à l'aide d'une boîte de jonction placée dans la galerie et d'un câble à 12 paires de conducteurs.

L'enregistrement des signaux a été effectué à l'aide d'un oscilloscope Tektronix à grande rémanence (plus d'une heure). Cette propriété permet de ne photographier que des phénomènes valables, préalablement contrôlés à l'oeil. L'amplificateur vertical, différentiel, a une sensibilité maximale de $10 \mu\text{V/cm}$. Comme les capteurs HS-J, sensibles à la vitesse particulière, ont une réponse linéaire (au-delà de 20-30 Hz.) de $12 \mu\text{s.}$, on peut donc apprécier des vitesses particulières de l'ordre de $0,2 \mu\text{s.}$

Les fréquences dominantes observées étant de l'ordre de 300 Hz., les amplitudes de déplacement décelables sont de l'ordre de 10^{-4} microns. La précision de l'amplificateur vertical, donnée par le constructeur, est de 5 %.

L'amplificateur horizontal, ou base de temps, permet des vitesses de balayage comprises entre 1 microseconde/cm. et 5 secondes par cm. avec précision de 3 %. Au Gage, nous avons employé des vitesses de balayage comprises entre 0,1 et 1 microseconde/cm.

La mesure des temps de parcours a été réalisée en déclenchant le balayage par un signal extérieur constitué par la réponse d'un capteur de déclenchement HS-J placé sur la barre-enclume. Le signal fourni par ce sismographe était amplifié cent fois avant d'être appliqué au circuit de déclenchement de l'oscillographe. Les huit séries de mesures réalisées sont indiquées sur la courbe de remplissage de la fig. 2.

Precision et reproductibilité des signaux

a) Au cours d'une même série

La fig. 3 donne un exemple de quatre chocs successifs enregistrés avec le même capteur (capteur d, 8ème série de mesures). La constante des temps, amplitudes et du « caractère » même des signaux, jusqu'aux moindres détails, est remarquable. Lors de chaque série, deux à huit mesures ont été réalisées pour chacun des capteurs avec des réglages à gain vertical élevé, dans le but de mesurer les temps.

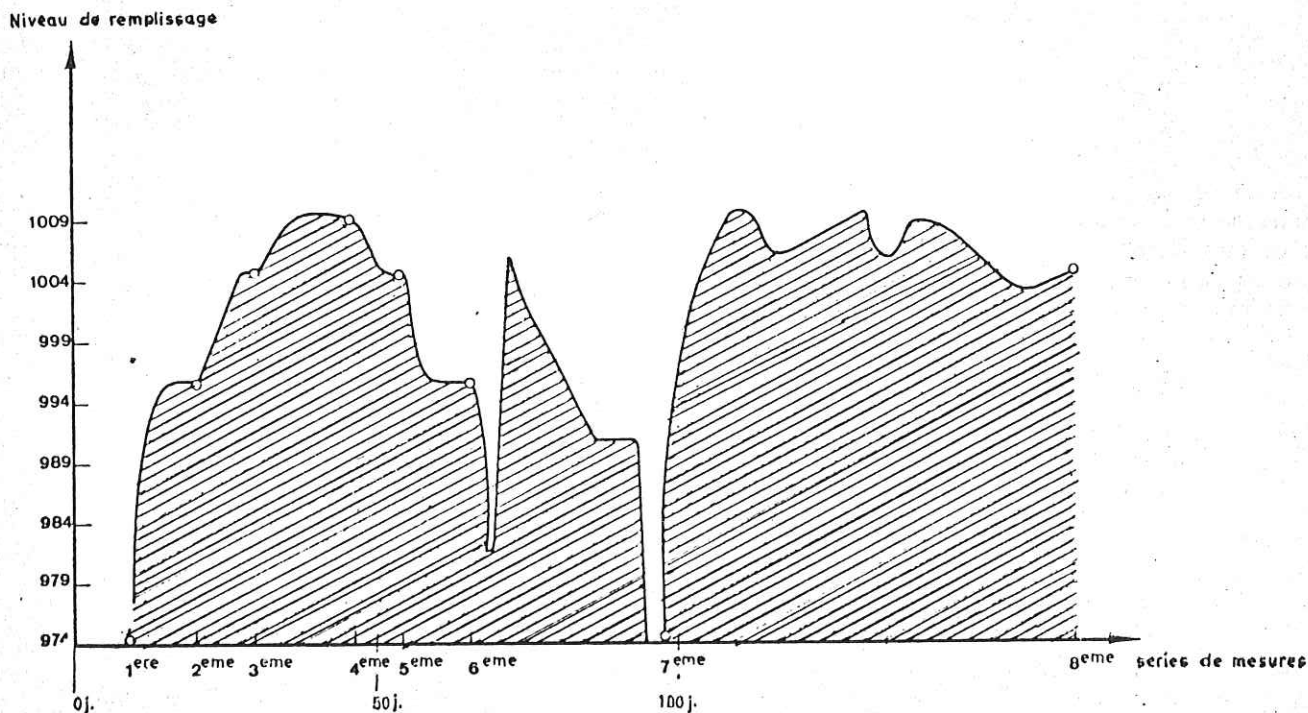


FIG. 2. Graphique de remplissage

En outre, trois à dix mesures ont été réalisées à intensité de choc constante afin de mesurer les amplitudes des signaux. Il est possible de calculer l'écart moyen quadratique qui varie de 4 à 6 % suivant les capteurs. Notons que ce qui est appelé « amplitude » est en réalité une tension proportionnelle à la vitesse particulière. Cette amplitude est mesurée entre un « pic » et un « creux » toujours les mêmes pour un capteur donné.

L'écart moyen quadratique sur les mesures de temps varie de 2 à 4 % suivant les capteurs et les séries de mesures. Cet écart est de l'ordre de 10^{-6} seconde, les temps moyens étant de quelques millisecondes en général.

b) *Constance de la forme des signaux enregistrés à diverses époques*

Pour un même capteur, les signaux enregistrés à diverses époques ont des allures remarquablement semblables, compte tenu de certaines variations de temps

CAPTEUR "d" 8^{ème} série

Constance des temps et amplitudes des signaux émanant de 4 chocs différents

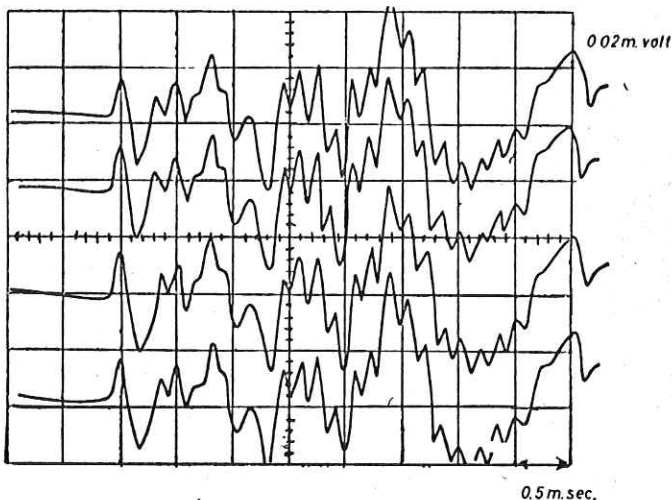


FIG. 3

et d'amplitude. Les divers « pics » ou « creux » observés sont parfaitement reconnaissables d'une série de mesures à l'autre. Ils ont donc un sens physique qui est fonction du terrain, du dispositif d'émission, du capteur et de la liaison capteur-terrain.

Nous fournissons à titre d'exemple les enregistrements réalisés à l'aide du capteur « a » (4^{ème}, 5^{ème} et 7^{ème} séries. Voir fig. 4).

Résultats

a) *Interprétation des signaux*

Sur les différents enregistrements fournis à titre d'exemple, on voit très clairement la première arrivée d'énergie, attribuée à l'onde longitudinale. Par contre, dans la suite de ces enregistrements, l'allure des divers « pics » et « creux », quoique constante, ne montre pas de façon évidente — du moins pour un profane — une arrivée

seconde bien différenciée. L'expérience acquise sur divers sites montre que cette différenciation nette n'a lieu qu'au delà d'une certaine distance, variable suivant les terrains, à partir de laquelle l'onde longitudinale a le temps de s'amortir avant l'arrivée de l'onde transversale.

L'exemple suivant (capteur g, série 8, fig. 5) montre plus clairement les deux arrivées. L'arrivée longitudinale est à faible amplitude, et à fréquence élevée (5.000 Hz. environ). L'arrivée transversale correspond à une énergie vingt fois plus grande et comprend une fréquence dominante plus faible (600 à 1.000 Hz.).

Sur les figures précédentes, nous avons pointé l'arrivée longitudinale (A) et le « pic » ou « creux » le plus proche de l'arrivée transversale la plus plausible (point B). Une fois choisi ce point B, il est facile de le retrouver d'une série à l'autre. Il peut subsister, bien entendu, un écart systématique entre le temps B et la véritable arrivée de l'onde transversale.

En ce qui concerne les « amplitudes », celles-ci ont été mesurées entre les points repères C et D. Il s'agit donc d'une tension proportionnelle à la vitesse particulière de l'onde transversale ($12 \mu V = 1 \mu/s.$).

b) *Caractéristiques dynamiques du rocher*

Les caractéristiques dynamiques moyennes étaient les suivantes:

	Avant mise en eau	Après mises en eau (8 ^{ème} série)	Rapport
Vitesse longitudinale.....	3.090 m./s.	3.850 m./s.	1,25
Vitesse transversale.....	1.720 m./s.	2.030 m./s.	1,18
Module d'élasticité dynamique.....	202.000 bars	286.000 bars	1,41
Coefficient de Poisson dynamique.....	0,28	0,31	1,11
Coefficient d'amortissement..	0,53	0,43	0,81

Les résultats montrent aussi que le granite du Gage est de bonne qualité, puisque sur d'autres sites granitiques ou gneissiques, nous avons noté des caractéristiques dynamiques similaires ou plus faibles.

c) *Variation des caractéristiques dynamiques en fonction du remplissage*

L'observation des variations de vitesses longitudinales et transversales, ainsi que des amplitudes montre que:

— De façon générale, les vitesses augmentent pendant le remplissage; ce phénomène, traduisant une compression, se poursuit suivant les capteurs jusqu'à la 4^{ème} (barrage plein), 5^{ème} (1.005) ou 6^{ème} série (996). En moyenne, le maximum est atteint à la 5^{ème} série, soit nettement après le début de la vidange. L'augmentation moyenne des vitesses est de 23 %, ce qui correspond à une augmentation du module d'élasticité de 47 %.

Ensuite, les variations sont plus faibles, avec une légère tendance à l'accroissement des temps (décompression) de la 6^{ème} à la 7^{ème} série (fin de la vidange), puis, parfois, une légère recompression de la 7^{ème} à la 8^{ème} (deuxième remplissage).

CAPTEUR "a"

Constance de la forme des signaux à diverses époques

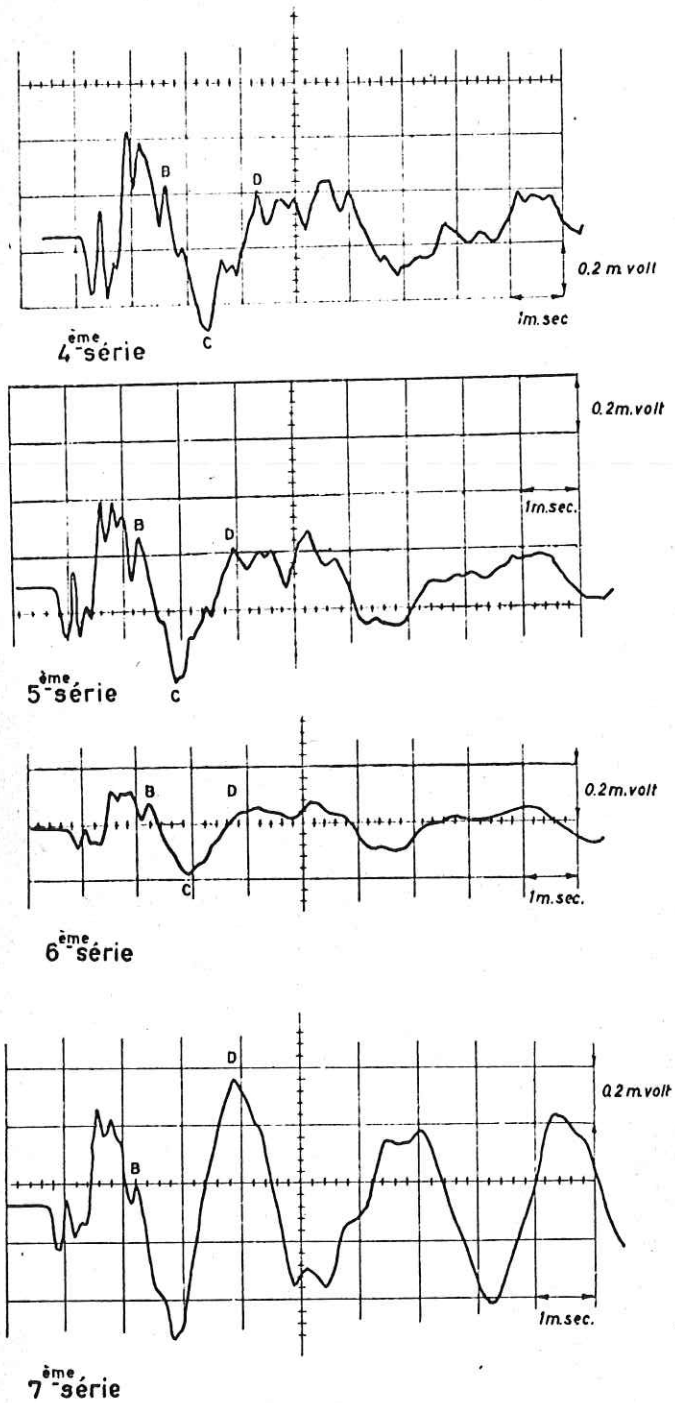


FIG. 4

— Les variations d'amplitude sont beaucoup plus importantes. On note une augmentation de la 1ère jusqu'aux 3ème (surtout) et 4ème séries (compression pendant le remplissage).

Pour les 3ème. et 4ème séries, l'accroissement est dans des rapports de 1,98 et 1,90, respectivement. Puis, on observe une décroissance de la 4ème (ou 3ème) à la 6ème série (vidange de la cote 1.009 à la cote 996), ramenant l'amplitude moyenne à 1,33 fois l'amplitude d'origine.

La 7ème série, correspondant pourtant à la retenue vide, montre une certaine recompression puisque la moyenne des amplitudes est de 1,66 fois plus élevée que l'amplitude initiale. Il semble qu'il faille voir ici l'influence retardée de la crue qui a eu lieu entre la 6ème et la 7ème séries.

Enfin, lors de la 8ème série, correspondant au barrage presque plein (1.005) après un long palier, l'amplitude moyenne était de 1,63 l'amplitude initiale. Le coefficient de Poisson varie peu, à part une première augmentation entre la première et la deuxième série; il aurait plutôt tendance à diminuer avec le remplissage.

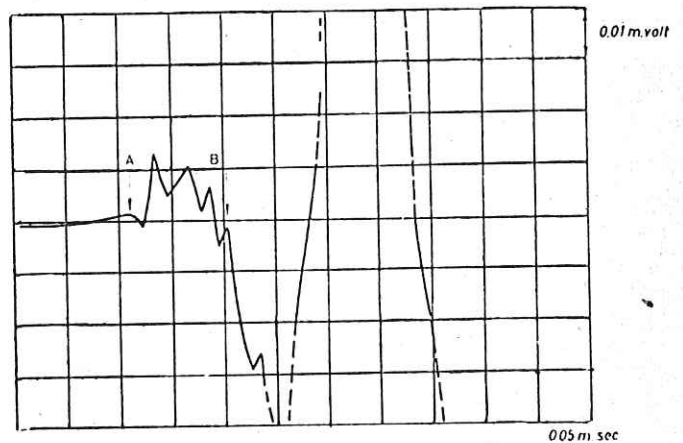
d) Répartition dans l'espace des variations d'amplitude

Pour une série donnée, les amplitudes mesurées dépendent:

— Du point de frappe et de l'intensité du choc. On a maintenu ce facteur constant. (Voir paragr. (a) du chapitre «Précision et reproductibilité des signaux».)

CAPTEUR "g" 8ème série

Identification des ondes longitudinales et transversales



A = Temps d'arrivée de l'onde longitudinale
B = Temps d'arrivée de l'onde transversale

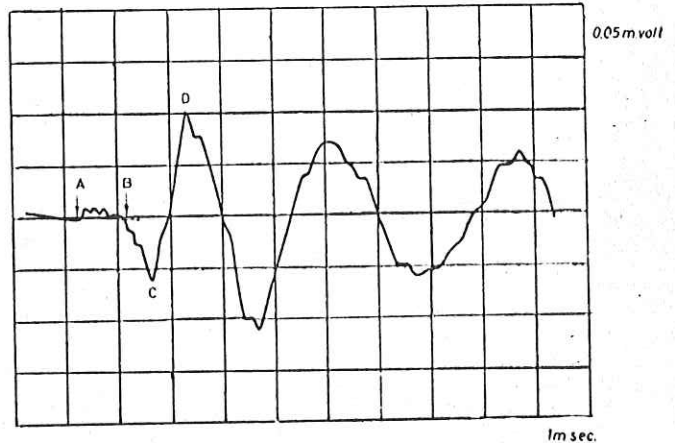


FIG. 5

- De la qualité du scellement du capteur et de son inclinaison (en principe la réponse des capteurs employés est maximale pour la position verticale): l'expérience montre que ce facteur a une importance très grande.
- Des caractéristiques d'amortissement du rocher, le long du parcours de l'onde: c'est ce facteur que l'on cherche à isoler. Pour éliminer l'influence des deux autres facteurs, nous n'avons considéré que des rapports d'amplitude entre deux niveaux de remplissage.

Diverses cartes de rapport d'amplitude ont ainsi été tracées. L'une d'elles est reportée sur la fig. 1.

Par convention, la valeur obtenue a été affectée aux deux tiers du segment reliant le point de choc au capteur (côté capteur).

Nous avons pu ainsi montrer que:

- pendant le remplissage (séries 3 et 4) et même au début de la vidange (série 5), il se forme de part et d'autre de la galerie deux zones comprimées, l'une inclinée et située le long du voile d'injection, l'autre à peu près à la verticale du barrage. Dans ces zones, les rapports d'amplitude sont de l'ordre de 1,5 à 2 (et parfois 3 et même 4). Par contre, autour de la galerie, et le long de voile de drainage, la compression est faible (1,3 en moyenne);
- pendant la vidange, la décompression est importante lors de la série 6 (cote 996), mais moins marquée à barrage vide (peut-être à cause de l'influence retardée de la crue du 10 Mars). Lors de ces deux séries, les deux zones plus comprimées subsistent toujours;
- après la longue période à niveau élevé (8ème série, cote 1.005), on retrouve le schéma général, mais avec des valeurs un peu plus faibles que lors de la 5ème série, également faite à la cote 1.005.

Les cartes de rapports de module dynamique fournissent des images très semblables à celles des rapports d'amplitude, mais plus atténuées.

En conclusion, les 8 séries de mesures d'auscultation sismique réalisées avant, pendant et après le remplissage du barrage du Gage II ont montré en ce qui concerne la technologie d'essai:

- la bonne précision des mesures de temps et d'amplitude permettant de comparer valablement des mesures réalisées à diverses époques,
- des variations notables des modules dynamiques et surtout des amplitudes en fonction du remplissage,
- la possibilité de détecter de façon qualitative les zones mises en compression, neutres, ou soumises à des efforts de traction.

Les résultats particuliers du Gage II sont les suivants:

- individualisation d'un bulbe de compression qui apparaît dédoublé par la présence de la galerie,
- une des parties comprimées coïncide avec le voile d'injection,
- la partie décomprimée coïncide avec le voile de drainage et le pourtour de la galerie.

D'autres mesures au laboratoire et sur le terrain devraient permettre une approche semi-quantitative. Nous espérons qu'avec un étalonnage correct, il sera possible ultérieurement d'indiquer des ordres de grandeur des contraintes dans le rocher de fondation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. TERRASSA, P. DUFFAUT, J. C. GARNIER, M. F. BOLLO.—*Auscultation sismique du rocher de fondation du barrage de Roujanel* (1er Cong. Int. Mec. Roches. Lisbonne, 1966. Rapport 8-19).
- [2] M. F. BOLLO, R. VIGNAUD.—*Méthode de recherche sur le comportement des massifs rocheux fissurés*. (1er Cong. Int. Mec. Roches. Lisbonne, 1966. Rapport 8-26).
- [3] ELECTRICITE DE FRANCE.—G. R. P. H. SAVOIE: *Auscultation sismique du barrage de la Girotte* (rapport C. P. G. F., non publié, 1963).
- [4] P. DUFFAUT.—*Possibilités et limitations des procédés géophysiques appliqués au Génie Civil*. (Bull. Tech. Suisse Rom. n.° 9, 6 Mai, 1967).
- [5] P. HABIB, P. AUDIBERT, G. VOUILLE.—*Variation de la vitesse du son dans les roches et les sables soumis à des contraintes élevées*. (C. R. Ac. Sc. Paris. T 260, Mai, 1965).
- [6] E. MATSUKAWA et A. N. HUNTER.—*The variation of sound velocity with stress in sand* (Proc. Phys. Soc. Sec. B. Vol. 69, Part. 8. N.° 440 B, 1956).
- [7] J. P. DAGNAUX.—*Contribution à l'étude de la propagation des ondes dans les sols* (Thèse de Doctorat de Spécialité Fac. des Sciences. Grenoble, 1968).
- [8] J. P. DAGNAUX, J. LAKSHMANAN et J. C. GARNIER.—*Analyse des amplitudes des ondes élastiques en vue de la détection des variations de contrainte dans les milieux fissurés* (Symp. Intern. de Mécanique des Roches. Madrid, 1969).