

P18

# **Méthodes d'auscultation sismique**

par J. LAKSHMANAN

# Méthodes d'auscultation sismique

par J. LAKSHMANAN

## RESUME

Après mise en place d'un dispositif d'auscultation sismique dans les forages à l'avant du front de taille, 20 séries de mesures échelonnées sur 7 mois, ont permis de montrer l'influence d'une machine à forer les tunnels sur les contraintes du rocher. Au-delà d'une zone décomprimée, il apparaît un anneau comprimé dont les caractéristiques s'améliorent jusqu'à un avancement de 5 diamètres, et se maintiennent même après 7 mois. Des essais sur échantillons permettent de formuler un pronostic sur les valeurs des contraintes moyennes.

## 1. INTRODUCTION

A la demande de la Régie Autonome des Transports Parisiens, et dans le cadre des mesures réalisées pendant la construction de la galerie expérimentale Bourse, la Compagnie de Prospection Géophysique Française a réalisé une auscultation dynamique.

Il s'agissait d'étudier, par auscultation dynamique, la décompression du rocher (calcaire grossier du Lutétien) pendant et après la perforation de la galerie expérimentale Bourse à la machine à forer de la Société Blanzv-Ouest.

Diverses études récentes réalisées par C.P.G.F. pour le compte d'Electricité de France [2], [3], [4], [5] ont confirmé que les caractéristiques dynamiques des roches fissurées variaient de façon importante en fonction des variations de contrainte.

En particulier, ces études ont montré que l'atténuation des ondes sismiques était un paramètre supplémentaire particulièrement sensible aux variations de contrainte, venant s'ajouter à celui constitué par la vitesse des ondes sismiques [1].

Il a donc été proposé de sceller des capteurs sismiques dans le rocher, à l'avant du front de taille, et de répéter des mesures de temps propagation et d'amplitude en fonction de l'avancement de la machine.

## SUMMARY

In order to study the influence of a tunnel driller on rock stress, seismic instruments were placed in drill holes in front of the machine, and 20 series of measurements made during 7 months. It was shown that behind a loosened zone, an annular compressed zone developed until the machine had drilled 5 diameters, and still existed 7 months later. After laboratory tests tentative values of average stress were computed.

## 2. DISPOSITIF DE MESURE

Il a été scellé 26 géophones miniatures HS-J dans 5 sondages inclinés, longs de 5 m et disposés en demi-cône (voir fig. 1). Le dispositif fut mis en place au PM 82,50 pendant un arrêt prolongé de la machine à forer.

Les géophones HS-J sont des capteurs électromagnétiques fournissant une tension proportionnelle à la vitesse particulière. La réponse de ces capteurs est pratiquement linéaire pour des fréquences comprises entre 15 et 3 000 Hz. Les fréquences observées étant de l'ordre de 500 à 1 200 Hz, les « amplitudes » des signaux enregistrés sont donc proportionnelles aux vitesses particulières. On a :

Vitesse particulière (micron/cm) = 60 x « amplitude » (millivolts).

Deux types d'émetteurs de chocs ont été utilisés. En effet, afin d'avoir des mesures avant la remise en route de la machine, il était nécessaire de placer un émetteur de chocs en arrière de la machine.

Le premier émetteur de chocs a compris une enclume scellée au tiers supérieur de la galerie, au PM 78,60, c'est-à-dire à 3,90 m du front de taille, et un balancier scellé en calotte. La chute d'un balancier de ce type d'une hauteur constante, permet en prin-

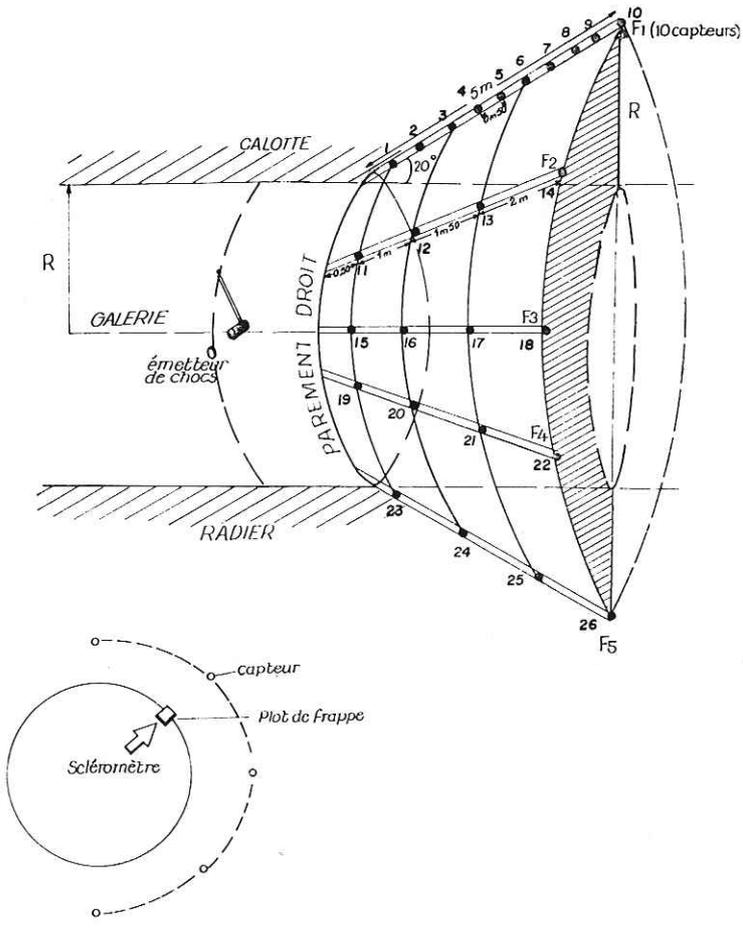


Fig. 1. — R.A.T.P. Schéma perspectif du dispositif de capteurs scellés

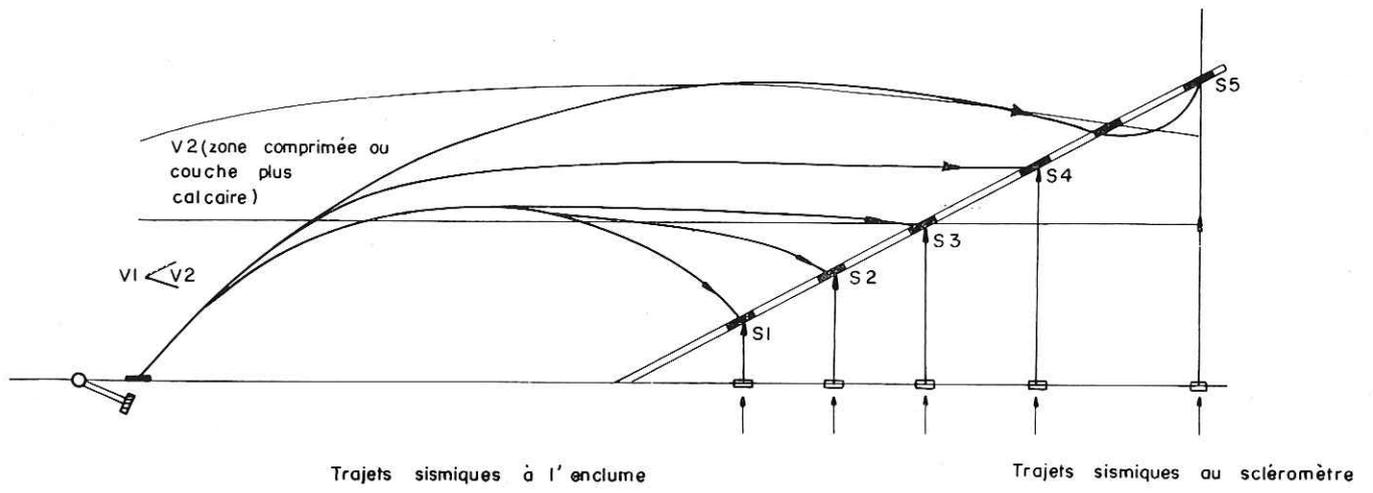


Fig. 2

cipe, l'obtention de signaux reproductibles et d'amplitude constante.

Ces mesures à « l'enclume » avaient l'avantage de pouvoir être réalisées dès l'origine, mais l'inconvénient de provoquer des ondes sismiques de trajets inconnus (voir fig. 2), en particulier dans le cas de couches de vitesses variables.

Par contre, les mesures du deuxième type, compre-

nant des chocs au scléromètre contre des plots scellés à la paroi de la galerie sur les mêmes rayons que chacun des capteurs, correspondaient à des trajets sismiques simples rayonnants autour de la galerie.

Cependant, ces dernières mesures n'ont pu être réalisées qu'au fur et à mesure du dégagement du plan vertical passant par chaque capteur.

L'enregistrement était effectué à l'aide d'un oscil-

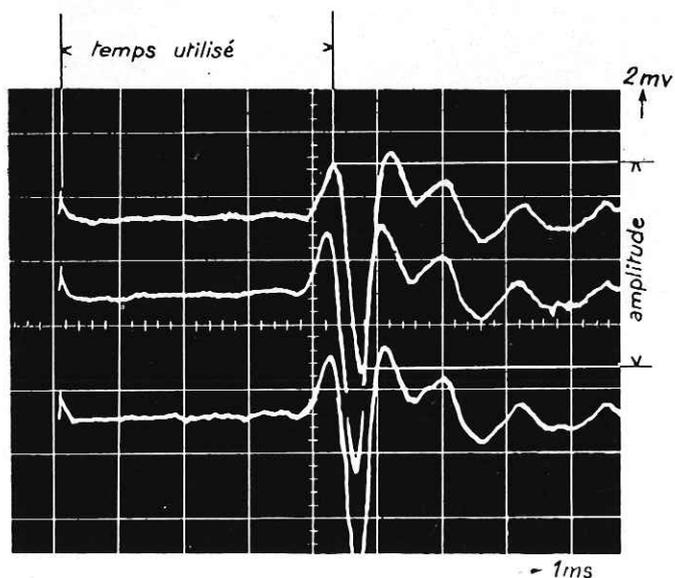
oscilloscope Tektronix à haute rémanence et à grande sensibilité. A chaque fois, il était possible de placer 4 ou 5 signaux correspondant à des chocs différents sur le même écran, la conservation du signal se faisant à l'aide d'un appareil polaroid.

### 3. MESURES REALISEES MODE DE DEPOUILLEMENT

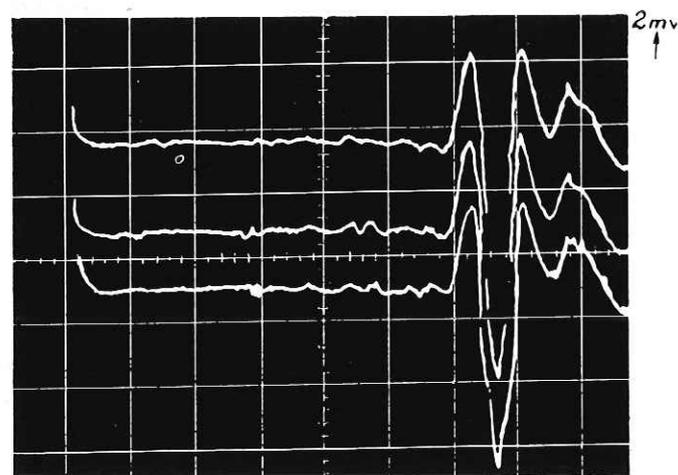
20 séries de mesures ont été réalisées suivant une progression logarithmique du temps (de 0 à 5 233 heures) et de l'avancement (de 0 à 180 m).

La figure 3 reproduit signaux obtenus avec le capteur 1 et l'enclume au cours des 1ère, 4ème et 12ème séries. On voit la fidélité de l'allure du signal, tant au cours d'une même série que d'une série à l'autre. Sur l'ensemble des capteurs, l'allure des signaux

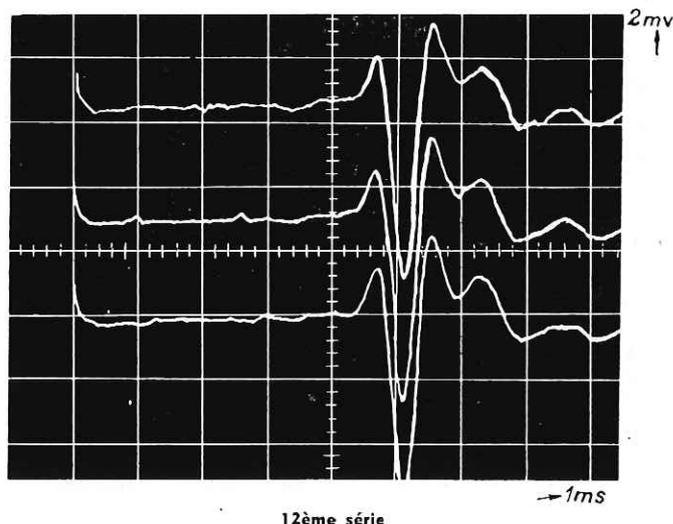
Fig. 3 — Mesures à l'enclume. Exemples d'enregistrement. Capteur 1



1ère série



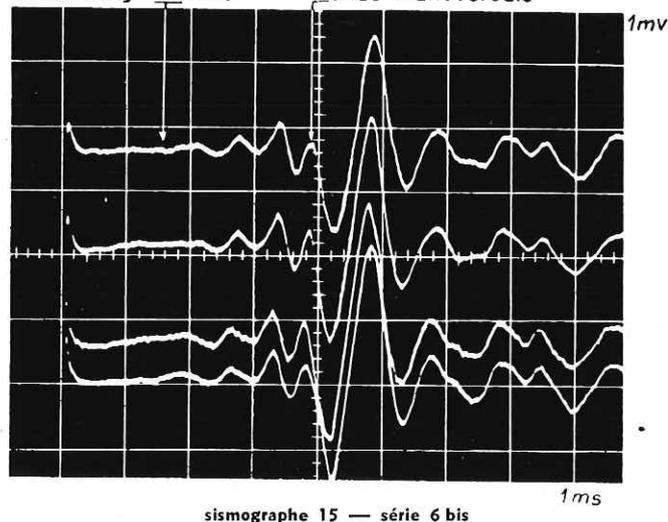
4ème série



12ème série

obtenus est généralement le même. La comparaison avec d'autres sites conduit à considérer ce signal comme étant provoqué par l'onde de cisaillement (vitesse transversale). La figure 4 reproduit deux signaux où l'onde longitudinale apparaît plus nettement qu'ailleurs, mais avec une amplitude 7 fois plus faible que l'onde transversale.

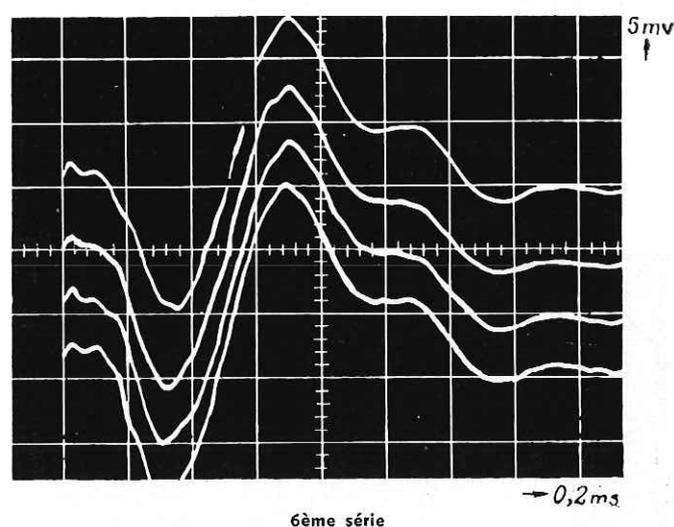
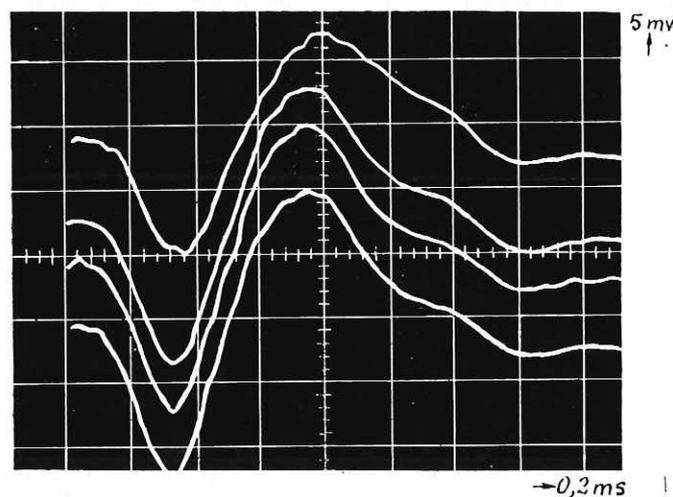
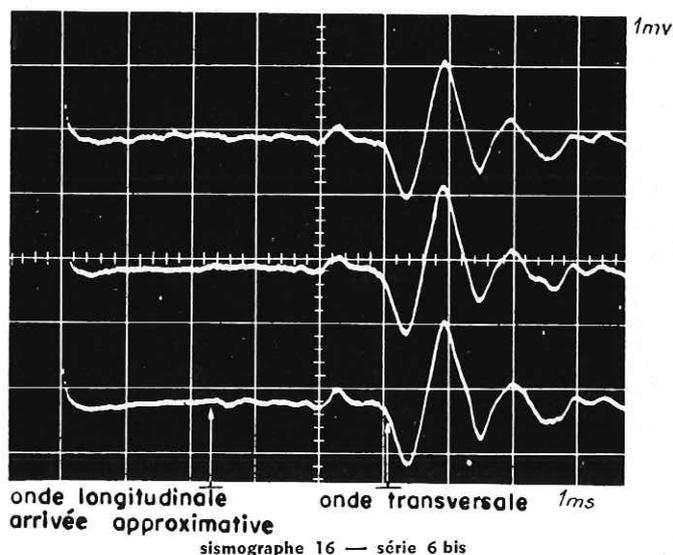
Fig. 4. — Mesures à l'enclume. Exemples d'ondes longitudinales visibles



sismographe 15 — série 6 bis

Le dépouillement a consisté à mesurer sur les enregistrements, pour chaque capteur et pour chaque série de mesures :

- le temps de parcours jusqu'à un « pic » caractéristique,
- l'amplitude crête à crête du signal entre un « pic » et un « creux » bien définie. La moyenne des 3 à 5 mesures réalisées à chaque point était retenue.



Au scléromètre, les distances étant beaucoup plus courtes, les vitesses de balayage employées sont beaucoup plus grandes (0,2 ms/cm au lieu de 1 ou 2 ms/cm). Compte tenu de ce changement d'échelle, les signaux sont bien du même type qu'à l'enclume, les « fréquences » étant légèrement plus élevées (1 400 Hz au lieu de 800-1 200 Hz).

La figure 5 fournit, à titre d'illustration, les enregistrements obtenus à l'aide du sismographe 1 (séries 2, 6 et 15). On voit que, si le temps et les amplitudes varient, le « caractère » du signal se maintient d'une série à l'autre.

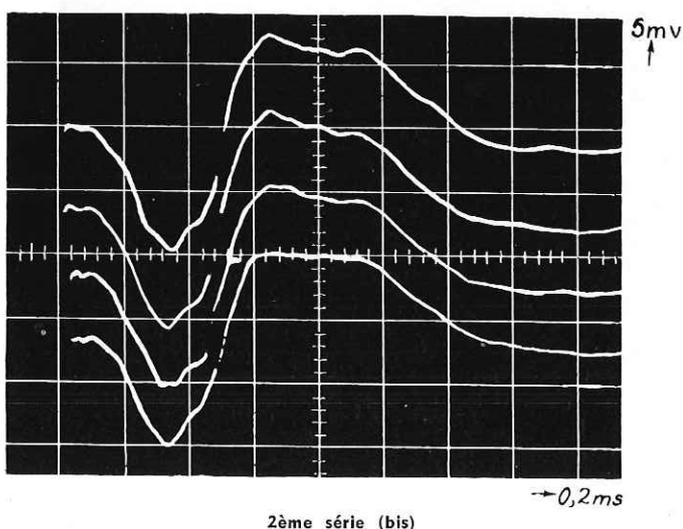


Fig. 5. — Mesures au scléromètre. Exemples d'enregistrement. Sismographe 1, plot P 1

Pour les mesures à l'enclume, nous avons contrôlé la *précision des mesures* de deux façons. Tout d'abord, nous avons répété 3 à 5 fois chaque mesure, l'ensemble étant photographié en une fois, grâce au

caractère rémanent de l'oscilloscope. On constate que les écarts sont faibles.

Un deuxième contrôle a été obtenu en répétant certaines mesures au début et à la fin de chaque série. Pour que ce contrôle soit le moins influencé par la perforation, deux capteurs témoins, R1 et R2, furent scellés sur la même génératrice que l'enclume, respectivement à 2 et 4 m en arrière de celle-ci. Ces mesures sur les capteurs R2, R1 et 1 furent reprises au début et à la fin de chaque série de mesures.

Pour pallier aux variations dues au descellement de l'enclume, il n'a été tenu compte que :

- des rapports d'amplitude entre capteurs adjacents,
- des différences de temps de parcours entre capteurs adjacents.

Pour résumer les différents calculs d'erreur qui ont été faits, on peut dire qu'en ne considérant que des temps différentiels entre deux capteurs adjacents, l'erreur doit généralement être inférieure à 5 à 7 %. En ne considérant que les rapports d'amplitude entre capteurs adjacents, l'erreur doit être inférieure à 10 à 15 %.

Pour les mesures au scléromètre où nous n'avons mesuré que les amplitudes, le seul contrôle réalisé a été la répétition (3 à 5 fois) des mesures en chaque point.

L'écart type général est de 6,2 %. Aucun phénomène de descèlement des plots n'a été observé. On peut donc admettre que les erreurs sur les rapports d'amplitude sont généralement inférieures à 10 %.

#### 4. INTERPRÉTATION DES MESURES D'AMPLITUDE A L'ENCLUME

L'interprétation des mesures d'amplitude à l'enclume a donc été réalisée en ne considérant que des capteurs adjacents. Afin d'éliminer les variations de distance, nous avons calculé des coefficients d'amortissement  $\alpha$  à l'aide de la relation suivante liant les amplitudes  $A$  et les distances  $r$ ,

$$A_i = \frac{A_{i-1} r_{i-1}}{r_i} e^{-\alpha(r_i - r_{i-1})}$$

Le coefficient d'amortissement  $\alpha$  doit être, en théorie, supérieur ou égal à 0. En pratique, à la galerie expérimentale comme sur d'autres sites, le calcul conduit assez souvent à des valeurs de  $\alpha$  négatives. Ceci doit s'expliquer par une concentration locale d'énergie liée à une répartition non sphérique de l'énergie.

Les résultats ont été établis sous les formes suivantes :

- graphiques sémi-logarithmiques  
 $\alpha = f \log$  (avancement)  
 et  $\alpha = f \log$  (temps) ;
- coupes verticales perpendiculaires à la galerie, sur lesquelles est projeté l'ensemble des résultats d'une série ;
- coupes longitudinales, où l'on a supposé le front de taille fixe et représenté les capteurs à des distances variables de ce front théorique. On a ainsi l'image d'une galerie fictive, creusée dans un terrain homogène, et dans laquelle nous disposerions de 20 séries de forages situés à des distances croissantes du front de taille, avec autant de point de choc et une seule série de mesure.

Il apparaît que les variations de  $\alpha$  en fonction du temps ou de l'avancement les plus grandes, sont situées le plus près de la galerie.

Les tendances générales sont les suivantes (voir fig. 6) :

- une diminution de  $\alpha$  jusqu'à la troisième ou quatrième série de mesures (avancement de 1 à 1,50 m), ce qui correspond à une compression ;
- un palier jusqu'à la 9ème série (avancement de 5 m) ;
- une diminution assez brutale de  $\alpha$  entre la 9ème et la 10ème série (avancement de 5 à 7,50 m), c'est-à-dire une nouvelle compression ;

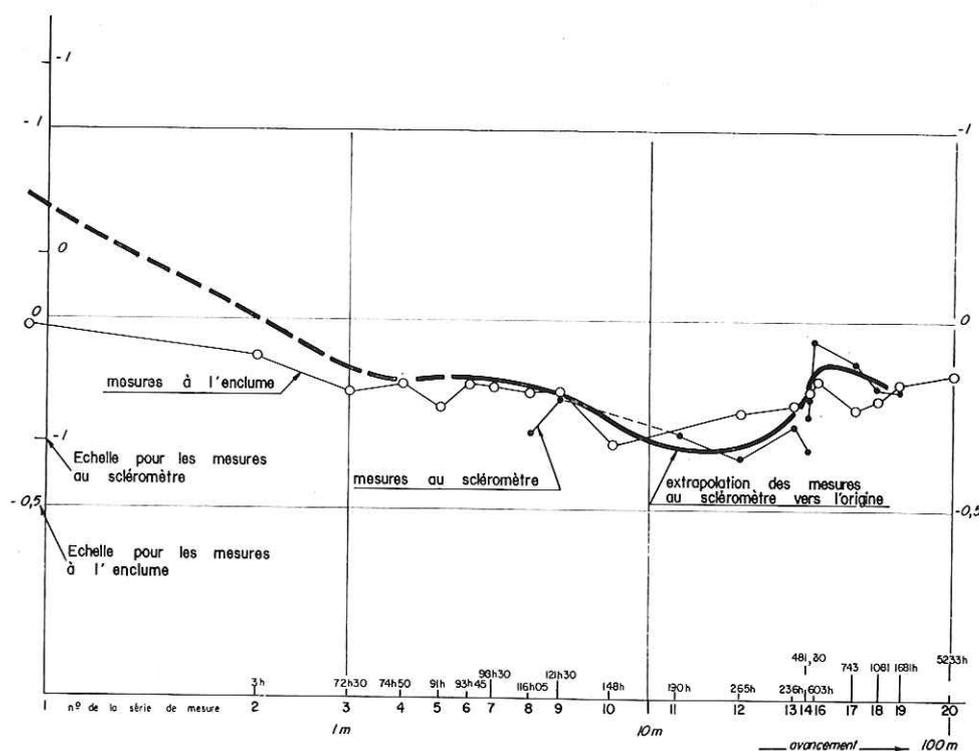


Fig. 6. — R.E.R. Galerie expérimentale Bourse. — Variations moyennes de  $\alpha$  le long de l'arc porteur en fonction de l'avancement

— une augmentation progressive de  $\alpha$  (c'est-à-dire une décompression) jusqu'à la fin des mesures,  $\alpha$  retrouvant les valeurs du palier 4ème série — 9ème série, sans retrouver les valeurs initiales.

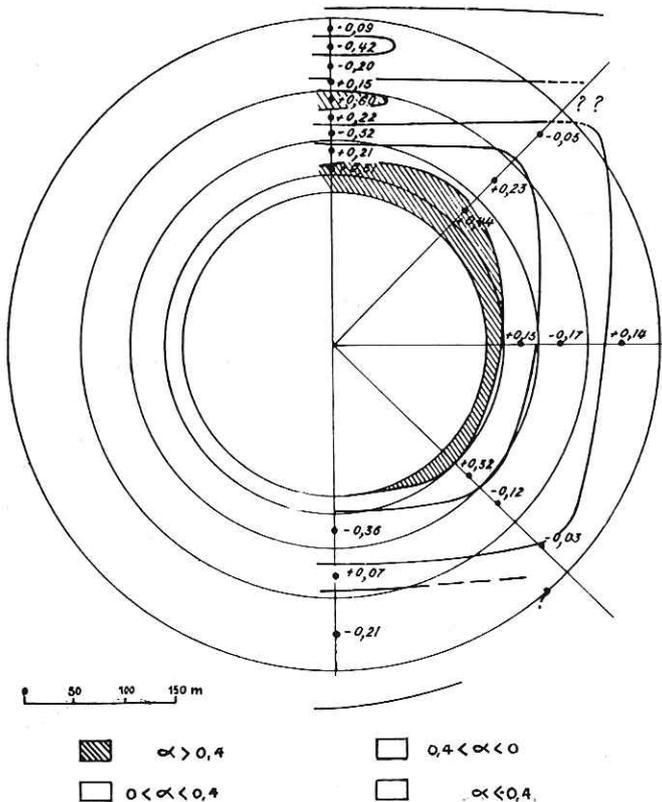


Fig. 7. — R.E.R.-R.A.T.P. Galerie expérimentale, section Auber-Nation. Auscultation dynamique. Mesures à l'enclume. Coefficient d'amortissement. 10ème série.

La compression maximale se situe donc après la 10ème série et avant la 12ème série (c'est-à-dire un avancement de 10 à 20 m).

Les coupes verticales perpendiculaires à la galerie montrent (fig. 7) :

- une zone décompressée proche de la galerie ( $\alpha = 0,5$ ) ;
- une surépaisseur décompressée près du front de taille, puis en parement ;
- une zone comprimée ( $0 < \alpha < -0,4$ ) située à une distance moyenne de 0,50 m à 1 m de la paroi ;
- une allure « carrée » de cette zone comprimée, qui semble être déformée par la présence de bancs plus durs en calotte et en radier ;
- des variations en calotte, au-delà de la zone comprimée, semblant être dues à des bancs plus ou moins durs ;
- une persistance de l'anneau comprimé même 7 mois après la perforation.

Nous avons défini les principes d'établissement des coupes longitudinales plus haut.

Ces coupes montrent (fig. 8) :

- l'importance de la zone décompressée au front de taille et en parement ;
- l'existence de deux zones à coefficient d'amortissement faible en calotte. La plus proche de la galerie fait certainement partie de l'anneau comprimé ; la deuxième peut correspondre à un niveau plus dur, indépendant de l'influence de la galerie ;
- la faible importance des variations du coefficient d'amortissement après que le front de taille ait avancé de 5 ou 10 m. En réalité, les zones comprimées ou décompressées semblent se créer à l'avant du front de taille, avant la perforation.

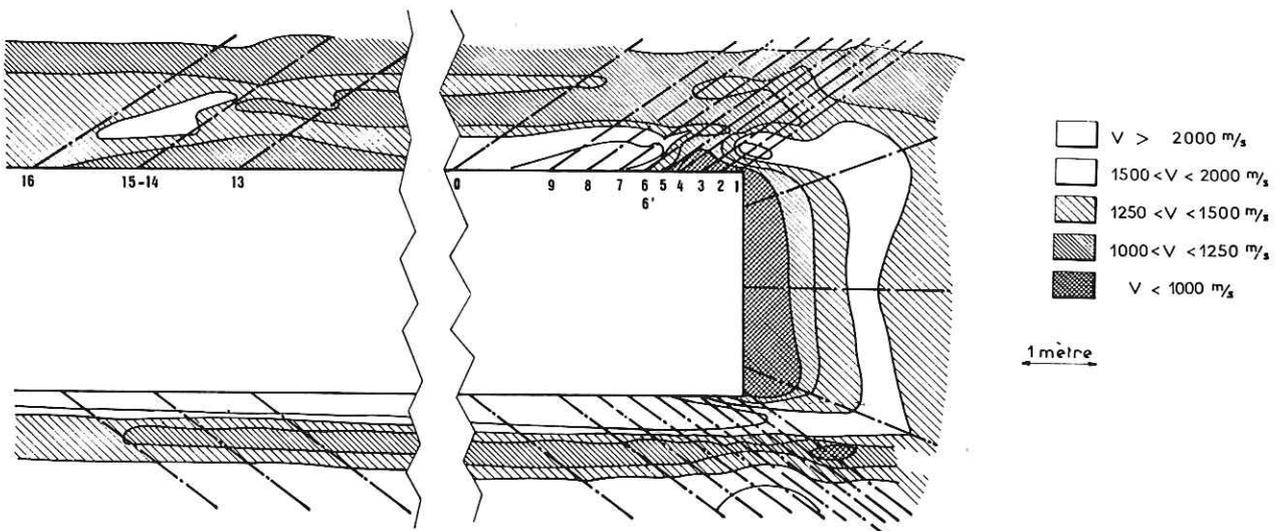


Fig. 8. — Variation des vitesses transversales en fonction de l'avancement

## 5. INTERPRETATION DES MESURES DE VITESSE A L'ENCLUME

Les vitesses mesurées, vraisemblablement transversales, sont généralement comprises entre 1 000 et 2 000 m/s.

Nous avons dressé les trois mêmes types de documents que pour les coefficients d'amortissement.

Les coupes obtenues sont très semblables aux coupes de coefficient d'amortissement (en particulier en ce qui concerne les bancs durs décelés en radier et en calotte) et montrent, en particulier :

- l'existence des zones comprimées presque en peau, en calotte et surtout en radier (vitesses de 1 500 à 2 700 m/s),
- la diminution progressive de la compression en calotte après la 9ème série (avancement de 7,50 m),
- l'existence d'une importante zone décomprimée en parement, l'anneau comprimé, s'il existe, n'ayant pu être traversé par les forages,
- la consistance des vitesses du haut vers le bas ce qui est normal compte tenu de la faible couverture en présence (28 à 35 m suivant les capteurs).

## 6. INTERPRETATION DES MESURES AU SCLEROMETRE

Ces mesures sont plus fragmentaires que les mesures à l'enclume. Néanmoins, elles ont un grand intérêt car les trajets sismiques sont certainement très proches de rayons de la galerie, alors que les trajets sismiques provenant de l'enclume subissent certainement des réfractions.

Comme pour les mesures à l'enclume, nous avons dressé :

- des coupes verticales perpendiculaires à la galerie,
- des coupes longitudinales établies suivant la même convention du front de taille fixe.

Ces coupes montrent l'existence d'un anneau comprimé dont l'axe se situe à 0,80 m en calotte et à 1,30 m en parement, de la paroi de la galerie, ce qui confirme très nettement les mesures à l'enclume.

Toutefois, les coefficients d'amortissement sont beaucoup plus différenciés, ce qui est normal, compte tenu du trajet imposé aux ondes sismiques. Dans l'anneau comprimé, on a :

$$- 1,4 < \alpha < - 0,5$$

et dans la zone décomprimée, on a :

$$+ 2 < \alpha < + 4$$

Les coupes longitudinales montrent l'importance des phénomènes ayant lieu à l'origine, probablement même à l'avant du front de taille. Les variations sont beaucoup plus faibles à partir de la 9ème série.

## 7. MESURES SISMIQUES CLASSIQUES EN PAREMENT

Afin de situer la section d'essai par rapport à l'ensemble de la galerie, deux profils de 180 m furent réalisés, l'un en parement, l'autre en radier. Chaque profil comprenait 6 dispositifs de 30 m (12 géophones, 4 points de tir).

Ces profils ont permis de déterminer les caractéristiques dynamiques moyennes du massif :

- Vitesse longitudinale : 3 330 m/s
- Vitesse transversale : 1 670 m/s
- Module d'élasticité : 164 000 bars (pour une densité de 2,2)
- Coefficient de Poisson dynamique : 0,33

Ces caractéristiques varient très peu le long de la galerie. En particulier, celles de la section d'auscultation se situent très près de la moyenne.

D'autre part, l'épaisseur décomprimée est presque constamment de l'ordre de 0,50 m, ce qui fait que l'anneau comprimé, mis en évidence par auscultation dynamique, est vraisemblablement continu.

## 8. ESSAIS SUR ECHANTILLONS

Le dispositif utilisé a permis de mesurer des variations de vitesse et d'amplitude pendant la mise en compression simple (jusqu'à 12 bars), de deux échantillons, l'un de calcaire homogène, d'aspect gréseux, l'autre de calcaire coquiller.

Les résultats se résument comme suit dans le tableau 1.

TABLEAU 1

	Vitesse longitudinale à 1 bar	Vitesse longitudinale à 12 bars	$\frac{dV_L}{dp}$
Calcaire gréseux	2 100 m/s	3 650 m/s	140
Calcaire coquiller	2 100 m/s	2 250 m/s (à 10 bars)	17

On peut donc apprécier la contrainte moyenne  $\sigma_0$  régnant dans le massif :

$$\frac{dV_L}{dp} = \frac{V_L \text{ massif} - V_L (1 \text{ bar})}{\sigma_0 - 1}$$

$$\text{d'où } \sigma_0 = 1 + \frac{(3330 - 2100)}{140}$$

$$\sigma_0 = 9,8 \text{ bar}$$

Avant de confronter les résultats concernant les vitesses dans les diverses zones entourant la galerie avec les mesures *in situ*, il convient de passer des vitesses longitudinales ( $V_L$ ) aux vitesses transversales ( $V_T$ ).

$$\text{On a ici : } V_T \approx \frac{V_L}{2} (\sigma \approx 0,33).$$

Nous devons donc considérer des gradients moitié de celles mesurées sur échantillons. Si l'on adopte

la valeur obtenue sur l'échantillon de calcaire gréseux (plus représentatif par sa vitesse de l'ensemble du massif), on aurait un gradient :

$$\frac{dV_T}{dp} = \frac{140}{2} = 70 \text{ m/s/bar}$$

Le tableau 2 résume les vitesses transversales moyennes et les contraintes moyennes correspondantes, ainsi que des résultats similaires obtenus à partir des coefficients d'amortissement.

TABLEAU 2

		Calotte	Parement (moyenne sur 3 forages)	Radier	Moyenne sur 5 forages
Vitesse transversales ( $V_T$ )	Paroi	1 200	870	1 200	1 000
	Anneau comprimé	1 450	1 750	2 100	1 700
	Profondeur	0,50 m	1 m	0,40 m	
	Massif				1 675
Coefficient d'amortissement Scléromètre ( $\alpha$ )	Paroi	+ 3	+ 3,3		+ 3,25
	Anneau comprimé	- 1,3	- 0,5		- 0,68
	Massif				+ 0,1
Contraintes moyennes  $\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$	$V_T$	3	- 1,7	3	0,2
	Paroi $\alpha$	5,3	3,6		3,8
	Moyenne	4,2	1,0	3,0	2,0
	$V_T$	6,6	10,9	15,9	10,9
	Anneau comprimé $\alpha$	15,0	11,3		12,5
	moyenne	10,8	11,1	15,9	11,7
	$V_T$				9,8
	Massif $\alpha$				10
	moyenne				9,9

En résumé, les contraintes moyennes seraient réparties comme suit :

En calotte : croissance rapide de 4 bars en peau à 10-11 bars vers 0,50 m de profondeur.

En parement : croissance moins rapide de 1 bar en peau à 10-11 bars à 1 m de profondeur.

## 9. CONCLUSIONS

Les mesures d'amplitude, tant avec le dispositif balancier-enclume qu'au scléromètre, confirmées par mesures de vitesses sismiques à l'enclume et complétées par des profils sismiques classiques et des essais sur échantillons, ont permis de montrer que :

— il se crée autour de la galerie forée en  $\varnothing$  3 m, un anneau comprimé se traduisant par des vitesses plus élevées et par des coefficients d'amortissement plus faibles.

— cet anneau n'est pas circulaire mais plutôt rectangulaire ; son axe est proche (0,50 m à 0,80 m) de la paroi en radier et en calotte, alors qu'en parement apparaît une zone décomprimée rejetant l'axe de l'anneau porteur à 1,30 m ou plus de la paroi ; dans le sens longitudinal, il est continu.

— la forme rectangulaire de l'anneau peut être due à la présence de bancs plus rigides ; il semble d'ailleurs exister d'autres bancs en radier et en calotte pouvant participer à la compression.

— l'anneau apparaît instantanément ou presque et se referme derrière le front de taille, ce qui fait que

même la mesure initiale la décèle.

- le front de taille est décomprimé sur 1 m d'épaisseur.
- la compression dans l'anneau s'accroît jusqu'à ce que la machine à forer ait avancé de 15 m environ (5 diamètres), puis elle décroît progressivement, mais est encore appréciable 7 mois après le début de la perforation.

A titre de pronostic, il a été possible de fournir une tentative d'appréciation quantitative des contraintes. La contrainte moyenne dans le massif serait de l'ordre de 10 bars. A faible distance de la paroi, les contraintes moyennes seraient plus élevées en calotte qu'en parement (à 20 cm : 7 bars au lieu de 3).

Il semble enfin que les résultats de cette campagne puissent être utilisés :

- sur le plan pratique, en contribuant à montrer que des revêtements pourront être posés avec un certain retard sur la perforation, et qu'ils n'auront pas à encaisser la totalité des contraintes.
- sur le plan scientifique, pour faire progresser la technique nouvelle d'appréciation des contraintes par auscultation dynamique, dans les zones inac-

cessibles aux moyens de mesure directe des contraintes.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. HABIB, G. VOUILLE et AUDIBERT : Variation de la vitesse du son dans les roches et les sables soumis à des contraintes élevées — C.R. Académie des Sciences — Paris — Tome 260, 10 mai 1965.
- [2] C. FAUROUX, J.C. GARNIER et J. LAKSHMANAN : Observation des variations de contrainte dans le rocher de fondation du barrage du GAGE II par auscultation dynamique, Symposium International de Mécanique des Roches, Madrid, 1968.
- [3] 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, Symposium International de Mécanique des Roches, Madrid, 1968.
- [4] J.P. DAGNAUX, J.C. GARNIER et J. LAKSHMANAN : Auscultation sismique de la craie soumise à des contraintes au laboratoire et in situ, 2<sup>me</sup> Congrès International de Mécanique des Roches, Belgrade, 1970.
- [5] Groupe de Travail du Comité National Français, quelques développements récents des moyens d'auscultation du massif rocheux, chapitre 4 par J.C. GARNIER, J.P. DAGNAUX et J. LAKSHMANAN : Auscultation sismique par mesures d'amplitude, 10<sup>me</sup> Congrès International des grands barrages, Montréal, 1970.