

P2

Les mesures de déformabilité à la paroi du massif rocheux

Quelques développements récents

par

P. DUFFAUT

et

J. LAKSHMANAN

*Ingénieur civil des Mines, Service Géologique
et Géotechnique d'Electricité de France
(Direction de l'Équipement, S.E.P.H.)*

*Ingénieur géologue E.N.S.G. Directeur géologique
de la Compagnie de Prospection géophysique française.*

THE MEASURES OF THE POSSIBILITIES OF DEFORMATION AT THE WALL OF THE ROCK-MASS SOME RECENT DEVELOPMENTS

The plate test, recognized in soil mechanics, is generally applied to rock-masses since some years (8 bibliographical references). The article describes some recent improvements of this test :

- 1. In the carrying out, one has been able to work directly on an excavation bottom and no longer in a gallery, by supporting the jack with a girder held in position by anchoring (up to a stress of 80 to 100 bars);*
- 2. In the interpreting of the measures : one always notes the disturbing effect of a superficial layer with a high possibility of deformation. The depression of the wall around the plate (« crater ») amply escapes from this effect;*
- 3. In the possibilities of rheological interpreting : one gives examples of flow, of recovery and one separates the effect of the delayed elasticity and that of the friction.*

LAS MEDIDAS DE DEFORMABILIDAD EN LAS PAREDES DEL MACIZO ROCOSO. ALGUNOS DESARROLLOS RECIENTES.

El ensayo de placa, clásico en mecánica de los suelos, es un procedimiento aplicado corrientemente a los macizos rocosos desde hace algunos años (ocho referencias bibliográficas). En este artículo se procede a la descripción de algunos perfeccionamientos recientes de este ensayo :

- 1. En la realización, se ha podido operar directamente en un fondo de excavaciones y no en galerías, apoyando el gato sobre un viga mantenida por anclajes (hasta un esfuerzo de 80 a 100 bares);*
- 2. En la interpretación de las medidas : se sigue comprobando siempre el efecto perturbador de una capa superficial de elevada deformabilidad. El hundimiento de la pared alrededor de la placa (« cráter ») se libra ampliamente de estos efectos;*
- 3. En las posibilidades de interpretación reológica : con ejemplos de fluencia, de recubrimiento, y se separa la influencia de la elasticidad diferida de aquella derivada de las fricciones.*

Introduction.

L'ESSAI le plus élémentaire de la mécanique des roches est l'enfoncement, perpendiculaire à la paroi du massif rocheux, d'une plaque rigide poussée par un vérin. Cet essai a été emprunté à la mécanique des sols : on mesure, en effet, l'enfoncement de la plaque pour des valeurs croissantes de la charge ; mais, sur les roches usuelles, deux différences essentielles le séparent de l'essai à la plaque classique :

Dans la réalisation, il n'est plus possible d'obtenir des charges suffisamment grandes avec une simple table de chargement, et c'est pourquoi la zone à essayer a été choisie le plus souvent dans une galerie, où la paroi opposée peut

fournir la réaction nécessaire. Le chargement s'effectue alors avec un vérin (d'où le nom, évidemment insuffisant, d'essai au vérin ; nous préférons parler simplement d'essai de chargement à la paroi) ;

Dans l'interprétation, parce qu'on n'obtient pratiquement jamais de rupture plastique permettant d'apprécier la cohésion et l'angle de frottement interne. Ce n'est donc plus un essai de rupture, mais seulement un essai de déformabilité. On en déduit un module de déformation ou plus exactement une gamme de modules correspondant à différents modes de déformation ou à différentes profondeurs d'investigation.

Les références bibliographiques [1] et [2] (*in fine*) en signalent des utilisations déjà anciennes. A Electricité de France, c'est M. Talobre qui a normalisé l'appareillage et les conditions d'utilisation de cet essai, d'abord en vue de son application aux ouvrages souterrains [3] [4] [5]. Après la catastrophe de Malpasset, la même méthode a été appliquée sur un grand nombre de sites de barrage [6] [7]. Le dernier

Congrès des Grands Barrages a montré que son utilisation était maintenant classique dans le monde entier [8]. En France, plusieurs laboratoires et entreprises disposent du matériel nécessaire à ces essais.

L'objet de cet article est de faire connaître quelques perfectionnements récents de cette méthode, tant dans la réalisation que dans l'interprétation.

1^{re} PARTIE

L'essai avec poutre ancrée.

Le problème.

On a quelquefois reproché aux essais en galerie de donner une idée fautive sur le comportement du massif rocheux au voisinage immédiat d'une fondation [9].

En outre, les galeries sont des ouvrages relativement coûteux et longs à exécuter. On s'est quelquefois satisfait de puits carrés de faible profondeur, mais on ne peut alors obtenir que des mesures parallèles à la surface libre du massif rocheux étudié.

Pour étudier la fouille d'un barrage mobile de hauteur modeste sur l'Ain, à Saut-Mortier, on a donc cherché à effectuer des mesures verticales sur un fond de fouilles

horizontal, sans longue préparation susceptible de gêner le déroulement des travaux d'excavation et de bétonnage.

La solution pratique.

On a donc conçu le dispositif représenté sur la figure 1, où la rotule et le vérin habituels s'appuient contre une *poutre horizontale*, retenue à 80 cm au-dessus du sol par des ancrages. Bien entendu, la barre de mesure des déplacements doit être disposée perpendiculairement à cette poutre.

Le dispositif a été calculé pour une charge totale de 50 t (ce qui correspond à une pression, supposée uniformément répartie, de 80 bars sur la plaque circulaire de 28 cm de diamètre ou 600 cm² de section). La poutre, d'une longueur de 3 m, pèse alors 350 kg, ce qui reste compatible avec les déplacements sur un chantier desservi par des engins mécaniques. Chaque ancrage est formé par quatre barres d'acier de 32 mm, filetées pour être faciles à boulonner sur des cavaliers. Les barres sont scellées au ciment prompt, sur une longueur de 1 m, dans des trous de 45 mm forés au marteau perforateur. Un gabarit en bois permet de forer les huit trous parallèles.

La justification théorique.

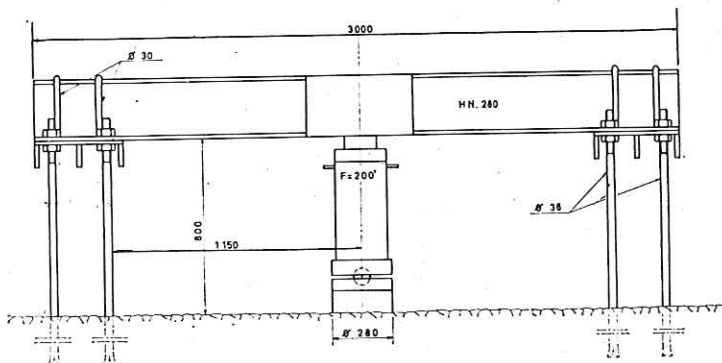
Il était nécessaire d'examiner l'influence des ancrages sur la déformation du massif rocheux. En élasticité, l'influence de la plaque chargée sur la surface d'un demi-espace continu, homogène et isotrope, se calcule grâce aux équations de Boussinesq. Plus généralement, l'effet d'une charge ponctuelle non plus à la surface, mais en un point intérieur au demi-espace, a été calculé par Mindlin [10].

La déformation de la surface sous l'effet des deux ancrages a donc été calculée, pour différentes profondeurs d'ancrage et avec différents coefficients de Poisson (en fait, ces variables n'ont qu'une influence très minime). En l'absence de toute autre déformation, la courbe supérieure de la figure 2 est la déformée du plan suivant l'axe de symétrie de la figure. Cette courbe apparaît extrêmement aplatie par rapport à la courbe inférieure qui représente, pour la même charge, l'effet de la plaque rigide supposée seule. Bien entendu, à partir d'une certaine distance, de l'ordre de 3 m, les deux effets opposés sont du même ordre et la déformation résultante est nulle.

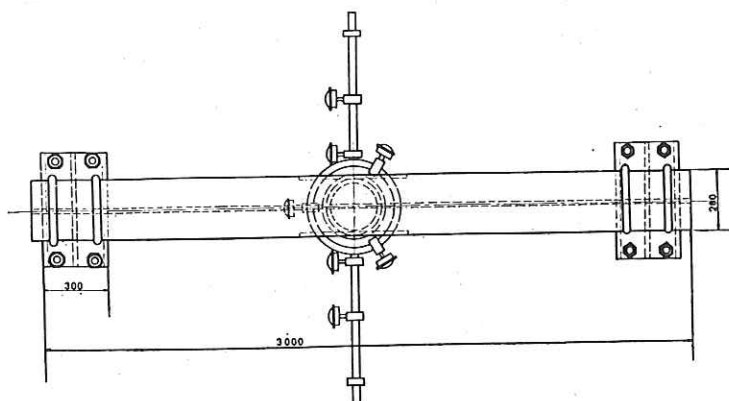
Au voisinage du centre, au contraire, l'enfoncement de la plaque est diminué d'environ 10 %. Mais comme la barre de référence est scellée seulement à 75 cm de part et d'autre du centre du dispositif, on constate qu'elle est soulevée, à 1 % près, de la même quantité que la région centrale.

Aussi peut-on raisonnablement négliger l'effet des ancrages sur les résultats (on sait que la dispersion des modules obtenus est le plus souvent bien supérieure à 10 %, et on ne considère, en général, comme significativement différents que des modules écartés de plus de 25 %).

Fig. 1. — Réaction du vérin sur une poutre ancrée (plan et vue de côté).



SCHEMA DU DISPOSITIF DE MESURE



L'utilisation

Cinq points de mesure ont été équipés sur le chantier de Saut-Mortier. Comme le rocher calcaire présentait un pendage faible variant de 10 à 15° dans la zone des mesures, on a été amené à surfacier seulement trois plaques en position horizontale; pour les deux autres, on a monté l'ensemble du dispositif perpendiculairement au joint de stratification naturelle.

La mise en place s'est avérée très facile puisque les cinq mesures ont pu être menées à bien en quatre jours, après un travail de préparation de trois jours.

Sur l'un des emplacements, on a constaté un arrachage à 70 bars de pression moyenne, mais le scellement avait été mal fait. Sur trois autres, on a poussé la pression, à titre de test, jusqu'à 125 et 130 bars sans qu'apparaisse aucun signe de fatigue des ancrages (mais c'était alors la limite élastique de la poutre).

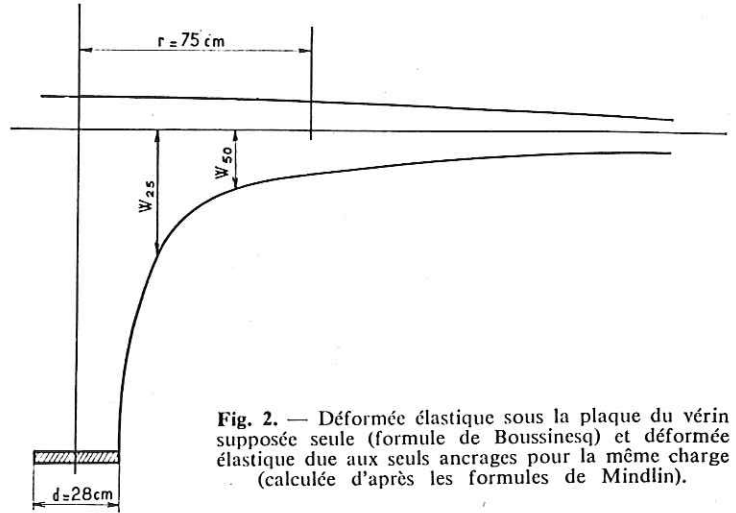


Fig. 2. — Déformée élastique sous la plaque du vérin supposée seule (formule de Boussinesq) et déformée élastique due aux seuls ancrages pour la même charge (calculée d'après les formules de Mindlin).

2^e PARTIE

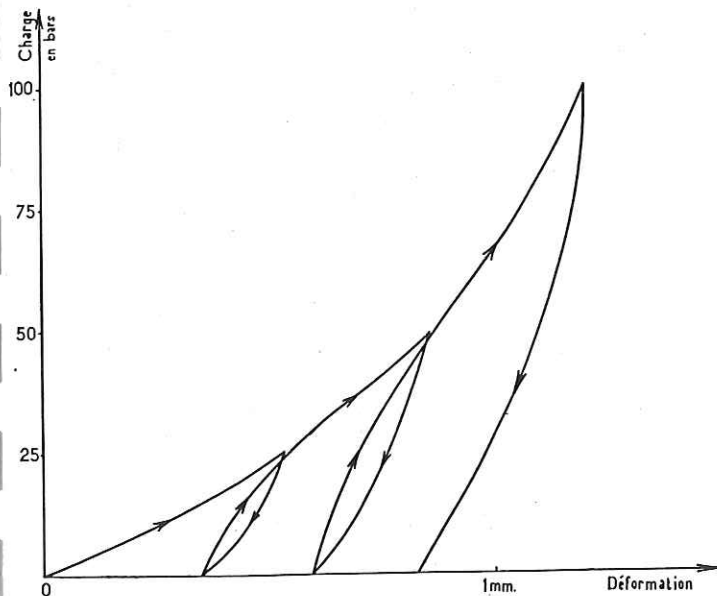
Les mesures de cratère et la profondeur d'investigation.

Profondeur d'investigation.

L'inconvénient principal de la méthode qui vient d'être décrite est la limitation des charges. Dans les tunnels, on a pu employer des vérins de grande puissance et exercer des pressions moyennes atteignant 200 et même 320 bars. On constate alors bien souvent que les modules vont en s'améliorant avec l'augmentation de la charge, comme on le voit sur la figure 3.

Il est nécessaire de comprendre l'origine de cette amélioration pour savoir d'abord quel est le module qu'il faut choisir, le long d'une courbe effort-déformation qui n'est jamais linéaire, et pour chercher ensuite les moyens d'améliorer les conditions d'essai.

Fig. 3. — Courbe effort-déformation typique (enfoncement de la plaque) montrant l'augmentation des pentes (ou des modules) avec la charge.



A la surface d'une excavation pour laquelle on a employé l'explosif, on est fondé à craindre que des fissures nouvelles n'aient quelque peu disloqué et affaibli la zone superficielle, et c'est pourquoi une épaisseur d'au moins 20 cm est toujours soigneusement enlevée par des moyens relativement discrets (brise-béton, puis boucharde pneumatique). Mais surtout il se manifeste une décompression superficielle qui se traduit par une certaine expansion du massif rocheux avec ouverture des joints.

Les mesures sismiques à petite échelle (« microsismique ») permettent de vérifier l'existence de cette zone, d'en mesurer l'épaisseur et quelquefois de mettre en évidence le passage progressif au massif profond non décomprimé. Cette transformation superficielle du massif rocheux évolue plus ou moins rapidement suivant les roches, les profondeurs et les dimensions des excavations (tableau et figure 4).

Puisque le matériau se trouve ainsi quelque peu ouvert, il est naturel que la première mise en charge produise un serrage des blocs élémentaires, qui explique en partie la différence de pente entre le premier cycle et les suivants.

Etude microsismique de l'épaisseur décomprimée à la paroi de quelques tunnels.

Nom du Site	Nature du rocher	Epaisseur du recouvrement	Diamètre de la galerie	Age de la galerie	Epaisseur décomprimée
Calacuccia ..	granite	12 à 23 m	2 m	1 mois	0 à 15 cm
Calacuccia ..	granite	12 à 23 m	2 m	8 mois	20 à 45 cm
Malpasset ..	gneiss	30 m	2 m	2 mois	10 à 30 cm
Isère-Arc ...	gneiss	1 800 m	6 m	6 mois	3 à 4 m
Mont-Blanc [11] ..	granite	2 500 m	8 m	—	jusqu'à 10 m
Vouglans ...	calcaire	12 m	2 m	—	20 à 60 cm

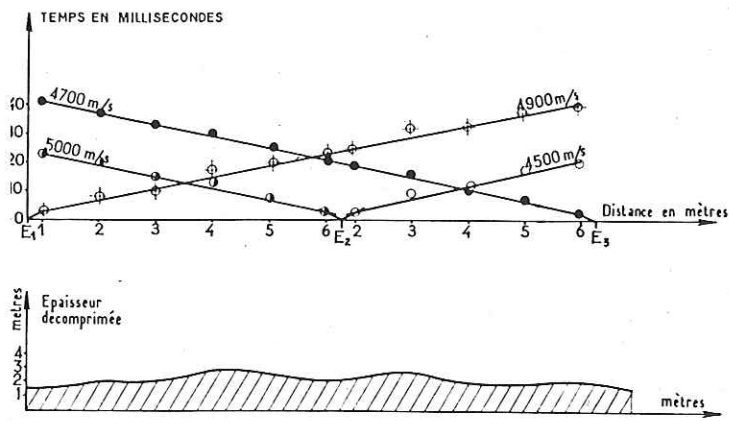


Fig. 4. — Exemple de décompression à la paroi d'un tunnel. Les vitesses et l'épaisseur sont déduites des courbes espace-temps (ou dromochrones) obtenues par la méthode sismique réfraction.

Lorsque la charge d'essai augmente, le serrage intéresse des couches de plus en plus profondes, et il apparaît donc particulièrement intéressant de « voir à travers » la couche décompressée, pour connaître des caractéristiques représentant mieux les réactions du massif en profondeur. Le serrage, toutefois, n'est important que sous la plaque, et, dès lors qu'on mesurera les déplacements de points extérieurs, on obtiendra une déformation moins affectée par la décompression superficielle.

Dans l'hypothèse plus simple d'un massif continu, on peut montrer l'influence considérable d'une mince couche superficielle de module plus faible : le calcul classique, suivant [12], s'applique aux déplacements des points A et B de la figure 5, situés à la distance r de l'axe de révolution, respectivement de part et d'autre de la couche superficielle d'épaisseur e , si E_1 et E_2 sont les modules.

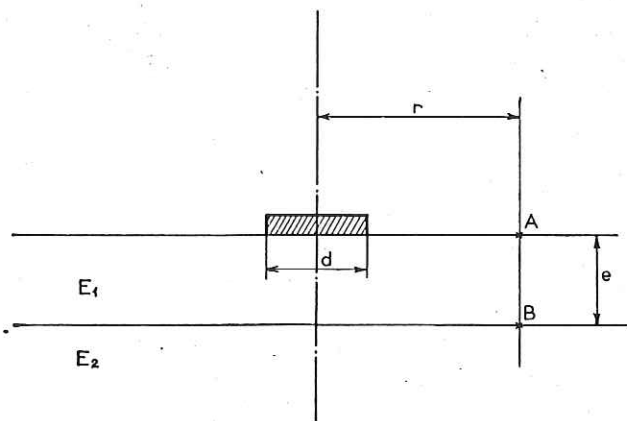


Fig. 5. — Notations employées pour un milieu à deux couches.

On appelle W_A l'enfoncement de A et W_B , l'enfoncement de B en supposant d'abord un module unique E_2 . La couche d'épaisseur AB se raccourcit donc de $W_A - W_B$.

Si on la remplace par une couche de module E_1 , sa déformation sera donc multipliée par $\frac{E_2}{E_1}$ et le nouvel enfoncement de A sera :

$$W'_A = W_B + \frac{E_1}{E_2} (W_A - W_B).$$

La figure 6 donne, d'après Boussinesq, les courbes d'égale déformation verticale dans le milieu homogène et la correction qu'y apporte, grâce au calcul précédent, la couche super-

ficielle de module plus faible. La figure est dessinée pour l'application numérique $\frac{E_2}{E_1} = 5$; $\frac{e}{d} = \frac{3}{4}$ (d = diamètre de la plaque).

Dans ce cas, l'enfoncement de la plaque pour une pression de 100 bars est trois fois plus fort que dans un milieu de module E_2 , et le module apparent est donc $\frac{E_2}{3}$ si l'on se borne à mesurer l'enfoncement de la plaque.

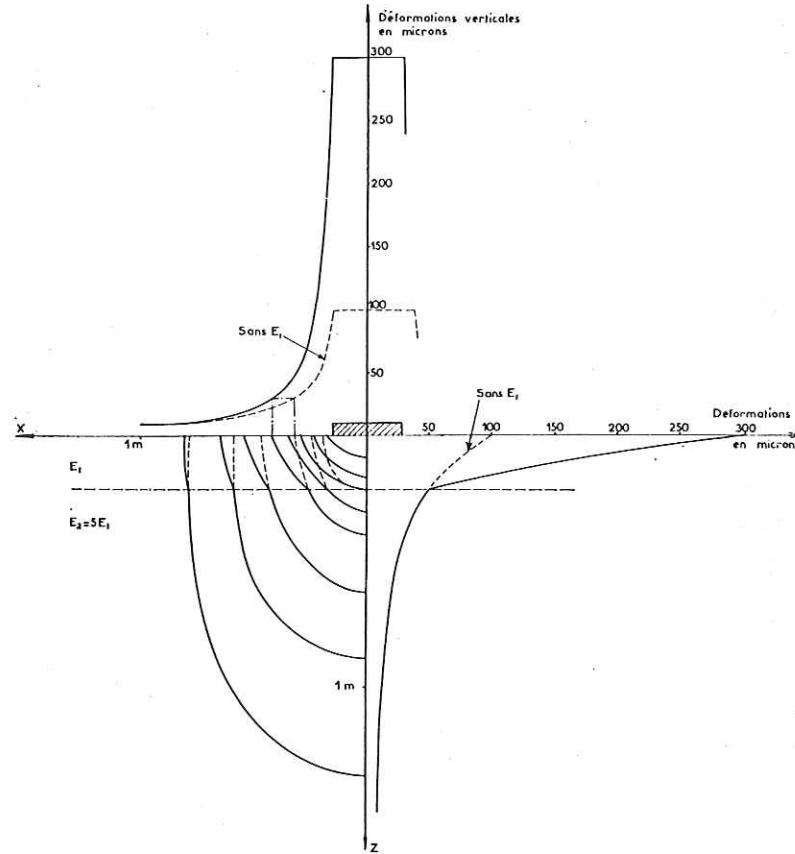


Fig. 6. — Effet de la couche superficielle. Le quadrant SW donne les courbes d'égale déformation verticale dans le demi-espace homogène et, en pointillé, la modification apportée par la couche superficielle. Le quadrant SE donne la déformation verticale le long de l'axe de symétrie. Le quadrant NW donne (à l'envers) la déformée de la surface, toujours avec et sans l'influence de la couche superficielle.

Mais la même figure 6 montre que la perturbation diminue très vite lorsqu'on s'écarte de la plaque. Pour une charge constante, la profondeur d'investigation peut donc être augmentée en mesurant les enfoncements au large de la plaque. En effet, le rapport 3 de l'exemple ci-dessus devient :

1,68 pour $r = 25$ cm (avec $d = 28$ cm) ;

1,15 pour $r = 50$ cm.

Les mesures de cratère.

Or, il se trouve que, depuis l'origine, M. Talobre avait pris soin de faire mesurer les déplacements de quatre points, situés à 25 cm et 50 cm de part et d'autre du centre de la plaque. Ce dispositif de mesure (et aussi le scellement à 75 cm de la barre de référence) avait été établi dans l'hypothèse de la rupture plastique suivant le schéma de Prandtl (courbe en « moustaches »). La figure 7 montre que, dans ce cas, le cratère formé par enfoncement élastique autour de la plaque fait place à un soulèvement.

Bien que ce cas de soulèvement n'ait été observé que tout à fait exceptionnellement, les mesures de cratère ont toujours été effectuées. Les rapports indiquent seulement les déforma-

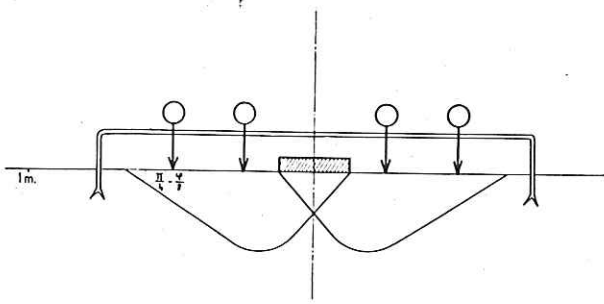


Fig. 7. — Position des points de fixation et de mesure par rapport aux limites de l'écoulement plastique selon Prandtl.

tions maximales et les déformations permanentes, mais il est possible de tracer les déformations en fonction des efforts appliqués. Il est donc facile d'utiliser de cette façon nouvelle tous les résultats anciens.

On a constaté immédiatement que les courbes effort-déformation obtenues restaient parfaitement reconnaissables, même pour les points les plus éloignés dont les déplacements sont souvent minimes. Mais contrairement aux courbes obtenues avec les plaques, jamais les courbes ne sont brouillées par le phénomène de « mise en place » (ce qui du même coup justifie l'appellation de mise en place pour cette partie de courbe inutilisable et trop fréquente (fig. 8).

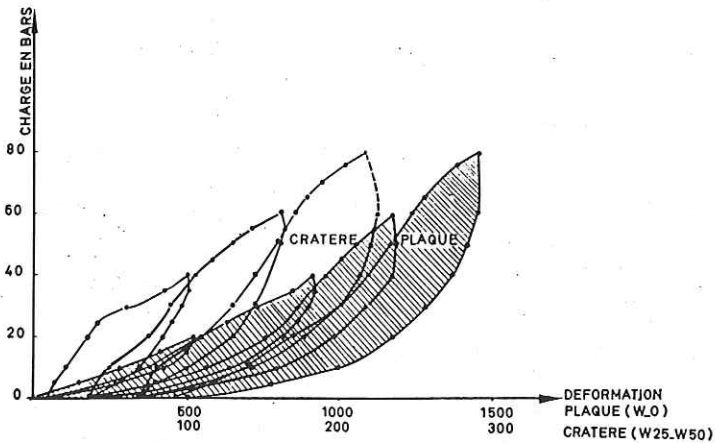


Fig. 8. — Courbes effort-déformation comparées pour l'enfoncement de la plaque et du cratère ($W_{25} - W_{50}$).

De même, l'allure générale de la courbe enveloppe du graphique présente beaucoup moins souvent cette allure concave vers le haut, qui peut faire prendre pour un écrouissage ce qui n'est que la progression du module avec la profondeur après disparition du serrage. Tout se passe donc bien comme si les points du cratère se déplaçaient en suivant le module des couches profondes rigides sans être influencés par le comportement des couches superficielles.

Un autre procédé a été imaginé, qui consiste à traverser la couche superficielle par un petit forage pour sceller un repère directement au point B de la figure 5. Mais les résultats obtenus à ce jour sont encore trop peu nombreux.

Interprétation.

Comment passer des pentes de ces graphiques à des modules de déformation? On remarquera d'abord que la mesure est faite par rapport à une barre de référence scellée seulement à 75 cm du centre (fig. 7). Le déplacement de cette barre introduit une erreur négligeable sur l'enfoncement de la plaque, mais non sur le déplacement des points situés à 25 et surtout à 50 cm du centre (voir fig. 2). Pour s'affranchir de cette difficulté, on utilisera donc la différence entre les mesures à 25 et à 50 cm.

Les formules de Boussinesq donnent l'enfoncement pour un milieu homogène (voir aussi [13]):

$$Wr = \frac{2E}{Mrpd(1-\mu^2)}$$

(avec les notations déjà utilisées et p pression moyenne).

Le coefficient Mr est donné par

$$Mr = \frac{2r}{d} \left[\int_0^{\pi/2} (1 + \frac{d^2}{4r^2} \sin^2 \theta)^{1/2} d\theta - \left(1 - \frac{d^2}{4r^2}\right) \int_0^{\pi/2} (1 - \frac{d^2}{4r^2} \sin^2 \theta)^{-1/2} d\theta \right]$$

Le calcul donne, avec un coefficient de Poisson $\mu = 0,25$ (1):

$$W_{25} = 78 \frac{P}{E}$$

$$W_{50} = 37 \frac{P}{E}$$

On en tire donc:

$$W_{25} - W_{50} = 41 \frac{P}{E} \quad (1)$$

avec la même convention, l'enfoncement de la plaque est

$$W_0 : 206 \frac{P}{E} \quad (2)$$

Le chapitre précédent montre que l'effet d'une couche superficielle à bas module doit être beaucoup plus faible sur $W_{25} - W_{50}$ que sur W_0 , et que les valeurs calculées à l'aide de la formule 1 doivent être environ 10 à 30 % au-dessous du module réel sous la couche superficielle. On obtient donc un module par défaut. Mais contrairement au résultat de la formule 2, c'est directement l'ordre de grandeur du module réel en profondeur.

On peut vérifier que les mêmes valeurs sont obtenues avec les formules 2 et 1 respectivement, pour des charges 3 à 4 fois plus faibles, ce qui montre tout l'intérêt de cette méthode.

3^e PARTIE

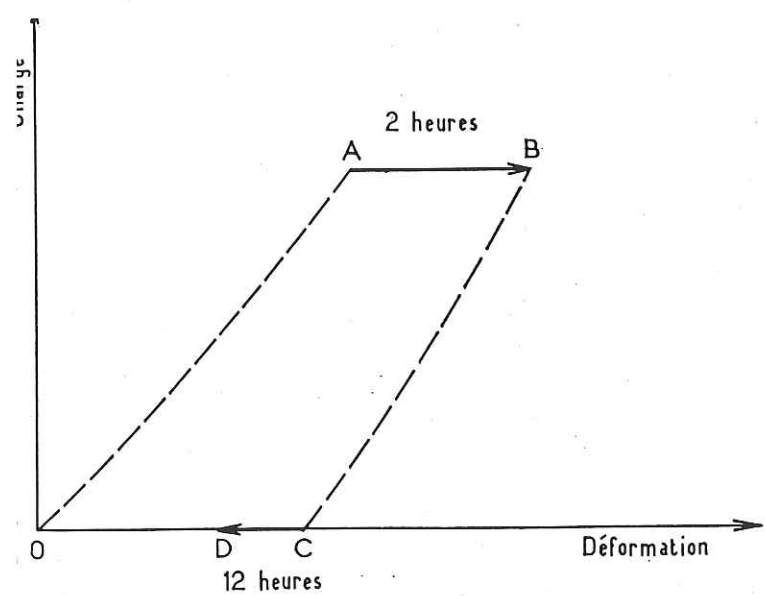
Fluage et recouvrance.

Définitions.

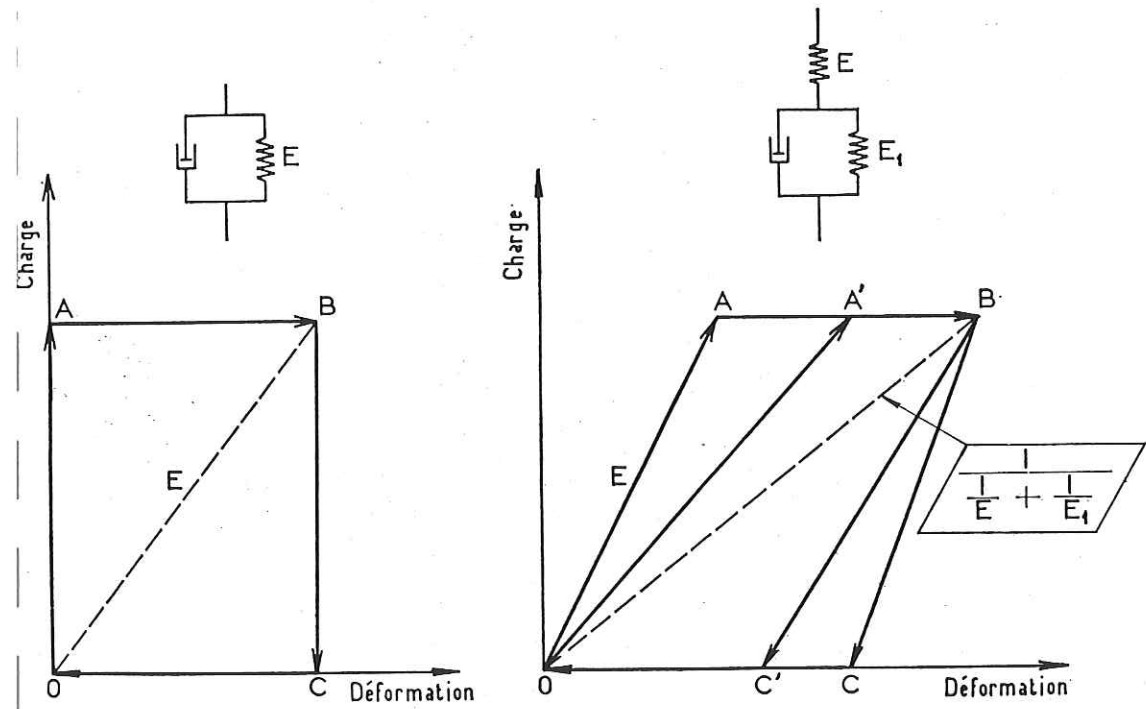
On appelle *fluage* la déformation qui se produit lorsqu'une charge est maintenue constante pendant une certaine durée qu'il est nécessaire de préciser (fig. 9). Dans les mêmes conditions, on appelle *recouvrance* la déformation qui se produit après la suppression de la charge. Dans le domaine élastique, ces déformations peuvent apparaître d'une manière transitoire, à la suite d'une modification de la charge, toutes les fois que l'établissement de l'équilibre requiert une certaine durée. Ce sont donc des manifestations de l'élasticité différée.

La figure 10 donne pour deux cas théoriques simples d'élasticité différée les courbes effort déformation et les schémas rhéologiques [14]. Si la variation de charge pouvait être considérée comme instantanée, la courbe décrite serait OA à la montée et BC à la descente. Dans ces conditions, le fluage et la recouvrance observés seraient maximaux (AB et CO respectivement). Si, au contraire, la variation de charge était suffisamment lente pour que l'équilibre soit à chaque instant

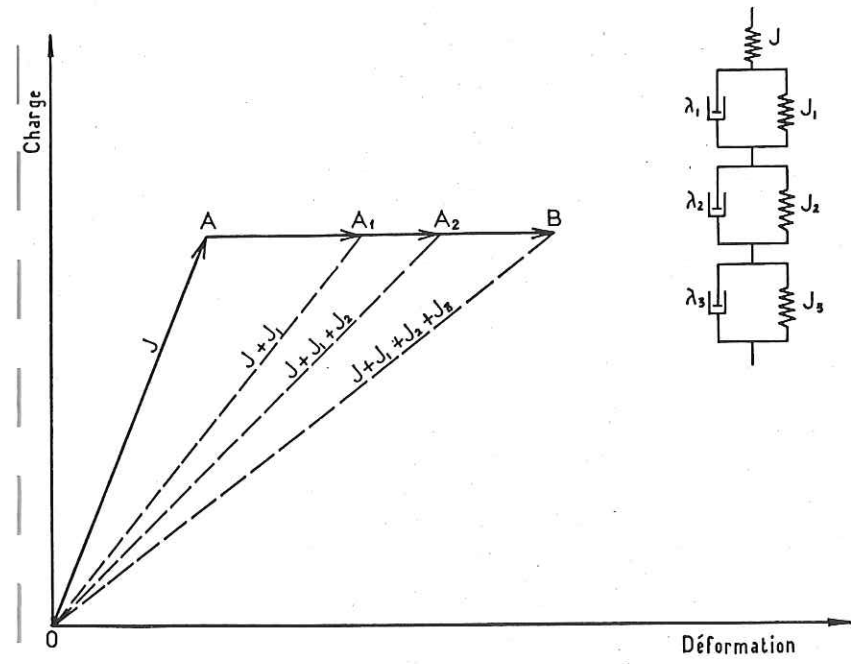
(1) On peut noter que l'influence de ce coefficient est faible puisqu'il intervient sous la forme $1 - \mu^2$.



← Fig. 9. — Définition du fluage AB et de la recouvrance CD.



← Fig. 10. — Deux cas élémentaires d'élasticité différée : courbe effort-déformation et schémas rhéologiques correspondants.



← Fig. 11. — Superposition de plusieurs élasticités différées élémentaires.

DEFORMATIONS EN MICRONS

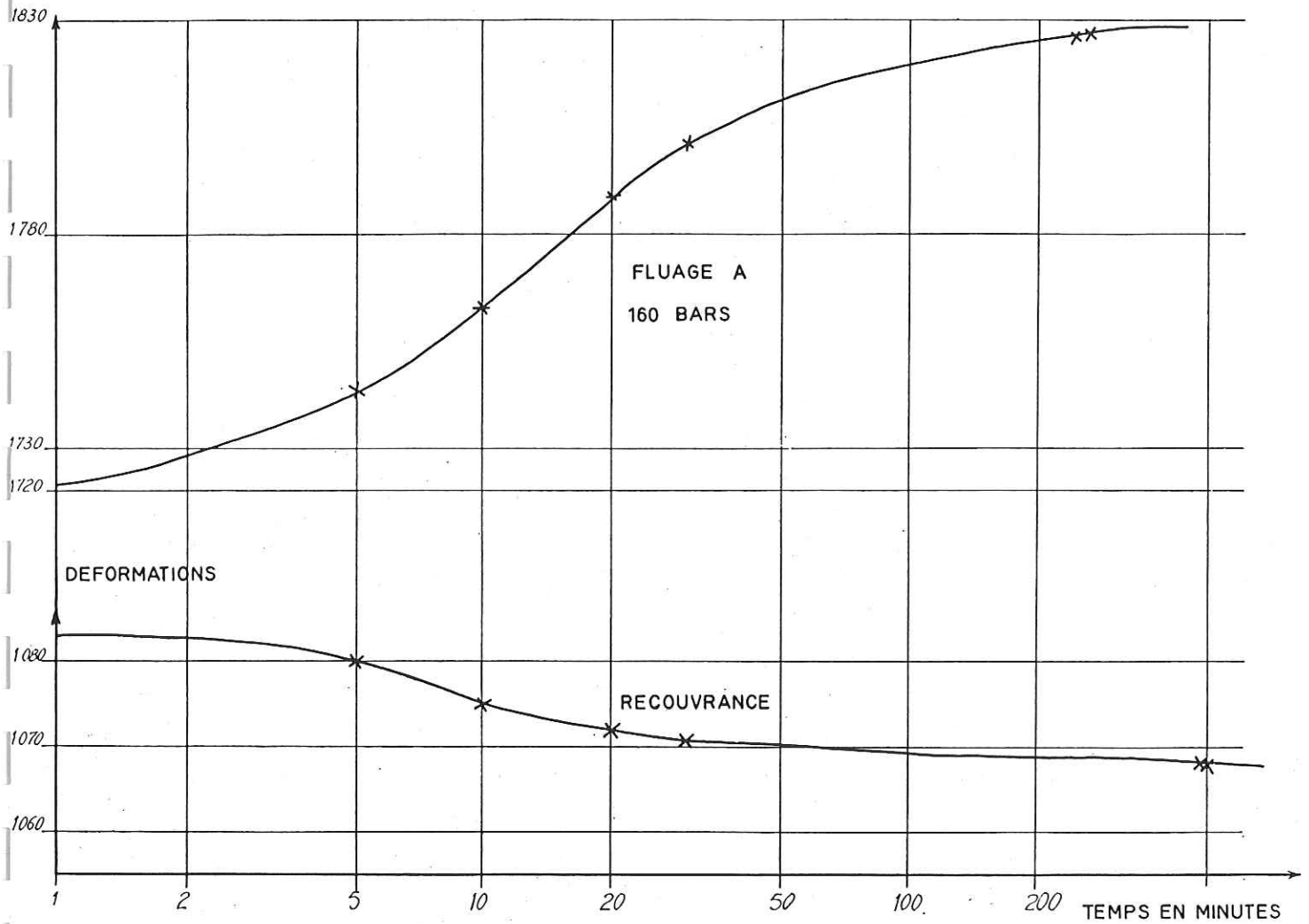
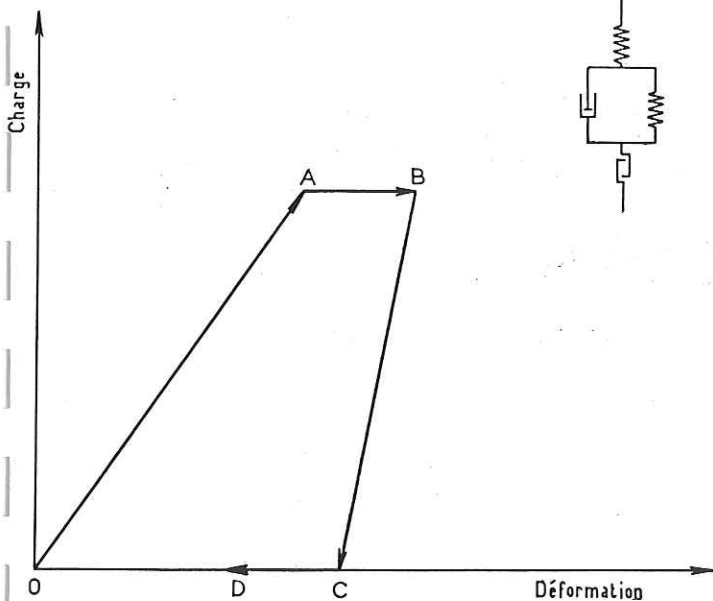


Fig. 13. — Courbes de fluage et de recouvrance pour le chantier de Calacuccia (en abscisses le temps).

Fig. 12. — Superposition d'une déformation irréversible de serrage, représentée par une butée.



réalisé, la courbe décrite serait OB. On conçoit que dans la pratique les courbes obtenues soient intermédiaires, du type OA'BC'O, et que leurs pentes n'aient plus aucun intérêt immédiat.

Il faut en retenir que les modules « lents » sont toujours plus faibles que les modules « rapides ». On peut penser que la déformation d'un massif rocheux, à l'échelle d'un barrage par exemple, comporte plusieurs comportements différés superposés, avec des constantes de temps d'ordres de grandeur nettement différents. La figure 11 donne un exemple où la relation entre la déformation ϵ et la contrainte σ est de la forme :

$$\frac{\epsilon}{\sigma} = J + J_1 e^{-\lambda_1 t} + J_2 e^{-\lambda_2 t} + J_3 e^{-\lambda_3 t}$$

où t désigne le temps, les λ des constantes de temps correspondant aux amortisseurs du schéma, les J les constantes élastiques des ressorts (inverses des modules, appelés quelquefois complaisances).

Dans le cas général, la déformation du massif rocheux comporte aussi une part non réversible qu'on peut représenter par une simple butée pour du serrage ordinaire. La figure 12 illustre ce type de déformation où la symétrie entre fluage et recouvrance disparaît, le premier seul comprenant le mouvement irréversible de la butée.

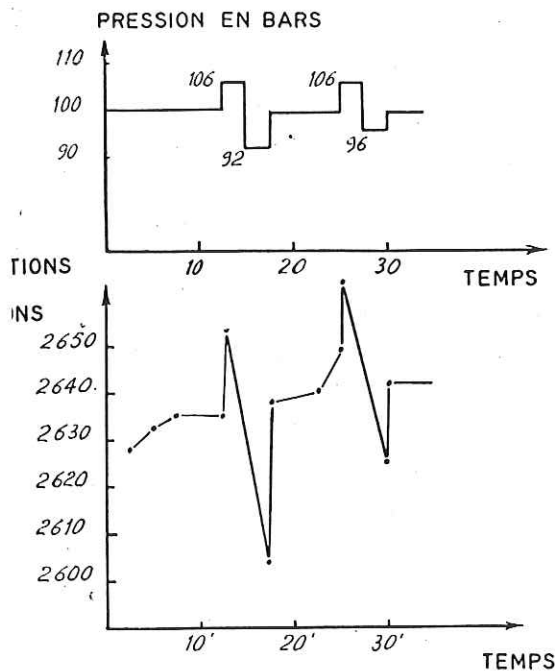


Fig. 14. — Charge crénelée alternée et fluage correspondant (en abscisses le temps).

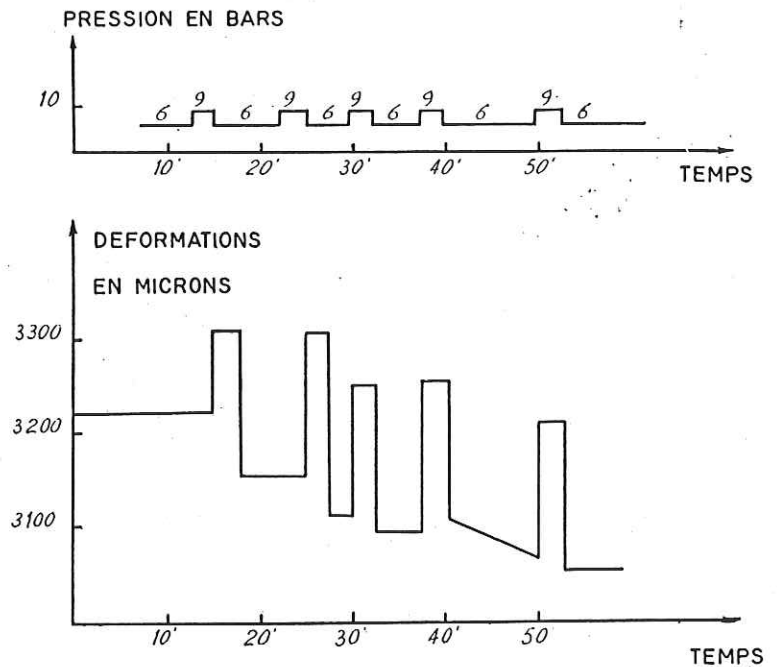


Fig. 15. — Créneaux à partir de zéro et évolution de la recouvrance (en abscisses le temps).

Emploi de charges crénelées.

La mesure expérimentale des déformations différées montre une stabilisation assez rapide pour le fluage (quelques heures), un peu plus lente pour la recouvrance (fig. 13). Nous avons pensé que cette stabilisation pouvait être en partie attribuée à des frottements, et nous avons donc remplacé la charge constante par une charge crénelée, c'est-à-dire que nous avons fait, à intervalles de temps réguliers, de petites variations de la charge.

Les figures 14 et 15 donnent les résultats de ces mesures sur le chantier de Calacuccia en Corse, mesures qui ont demandé une précision inusitée (lectures à 2 microns près). Les créneaux alternés autour d'une charge constante ont donné des résultats peu lisibles. Au contraire, la recouvrance a évolué d'une manière très régulière, chaque créneau lui ajoutant une quantité décroissante. On envisage de remplacer à l'avenir l'effet des créneaux par des chocs ou des vibrations.

On peut donc supposer que le schéma rhéologique comprend aussi des patins à frottement en parallèle avec des ressorts.

Cela s'accorde bien avec les résultats publiés tout récemment par Morlier [15].

Remerciements.

Nous sommes redevables du calcul de Mindlin à M. Beaujoint, du Centre de recherches et d'essais de Chatou, et du projet de poutre à M. Comès, du Service géologique et géotechnique.

Nous avons bénéficié de l'appui et de la compréhension du Service de la Production hydraulique pour le chantier de Saut-Mortier et de la Région d'Équipement hydraulique n° 5 pour le chantier de Calacuccia. Nous les remercions de nous avoir autorisés à en donner quelques résultats.

Mais ce travail aurait été impossible sans la collaboration établie depuis trois ans par le Comité français des Grands Barrages en Mécanique des Roches appliquée.

P. DUFFAUT et J. LAKSHMANAN.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DROUHIN ● Essais géotechniques des terrains de fondations ● Rapport 36 au 2^e Congrès des Grands Barrages ● Washington 1936.
- [2] HABIB ● Détermination du module d'élasticité des roches en place ● Annales I.T.B.T.P., septembre 1950.
- [3] TALOBRE ● La Mécanique des roches ● Dunod ● Paris 1956.
- [4] TALOBRE ● Dix Ans de mesures de compression interne des roches; progrès et résultats pratiques. Geologie und Bauwesen nos 2-3, 1960.
- [5] TALOBRE ● La Détermination expérimentale de la résistance des roches d'appui des barrages et des parois de souterrains. 7^e Congrès des Grands Barrages ● Question 25 ● Rome 1961.
- [6] Rapport de la commission d'enquête du barrage de Malpasset ● Ministère de l'Agriculture 1961.
- [7] MAZENOT ● Interprétation de nombreuses mesures de déformations exécutées sur massifs rocheux par E.D.F. Annales I.T.B.T.P., 18^e année, n° 206, février 1965.
- [8] 8^e Congrès des Grands Barrages, question 28, Edimbourg 1964, notamment rapports 15 et 18 rédigés par des groupes de travail français.
- [9] JAEGER ● Rock mechanics and dam design ● Water Power ● Vol. 16, n° 5, mai 1964.
- [10] MINDLIN ● C. R. Académie des Sciences, t. 201, p. 536 ● 1935.
- [11] BOLLO ● Intervention à la conférence de Santa Monica ● State of stress in the earth's crust ● Elsevier ● New York 1963.
- [12] CAQUOT et KERISEL ● Traité de mécanique des sols ● Gauthier-Villars ● Paris 1956.
- [13] WALDORF, VELTROP et CURTIS ● Foundation modulus tests for Karadj Arch Dam ● Proceedings A.S.C.E., vol. 89, n° SM 4.
- [14] PERSOZ (et al.) ● Introduction à l'étude de la rhéologie ● Dunod ● Paris 1960.
- [15] MORLIER ● Etude expérimentale de la déformation des roches (thèse) ● Revue de l'Institut français du pétrole, octobre et novembre 1964.

Extrait de TRAVAUX, numéro de novembre 1965.