INTERNATIONAL SOCIETY FOR
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING

SIMSG ISSMGE

This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

https://www.issmge.org/publications/online-library

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

La Mécanique des roches

Rock Mechanics

A. MAYER, *Ingénieur général des Mines (e.r.), Président du Centre d'études et de recherches de l'Industrie des liants hydrauliques, Paris, France*

SOMMAIRE

L'auteur s'efforce de présenter un résumé des techniques et des méthodes mises au point au cours des dernières années pour l'étude de questions mettant en jeu les propriétés mécaniques des roches. Il choisit à cet effet trois applications particulières, les fondations de barrages, la construction d'ouvrages en souterrain (tunnels, galeries en charge, usines souterraines), et la stabilité des pentes, et il indique pour chacune d'elles les méthodes récentes qui permettent de résoudre les problèmes qu'elles posent.

A l'occasion des études de fondations de barrages, il rappelle les méthodes d'étude des propriétés des roches au laboratoire et en place. Parmi les premières, il passe en revue les mesures de résistance à la compression et de fluage, de dureté, de perméabilité, en insistant sur les variations de celle-ci avec les contraintes appliquées, de l'altérabilité et le cas particulier des matériaux stratifiés. Passant aux essais en place, il énumère ceux auxquels il convient de procéder pendant la reconnaissance, essais géophysiques, mesures de contraintes, détermination du module de déformation en profondeur et mesure de la résistance au cisaillement dans les terrains stratifiés. Il examine ensuite les conditions d'application des résultats à l'étude du projet; enfin les méthodes d'auscultation des massifs une fois les ouvrages terminés.

L'auteur examine enfin certains problèmes qui se posent dans l'exécution d'excavations souterraines et indique les méthodes de mesure des charges sur les revêtements avec différents types de roches. Il termine par quelques indications sur la stabilité des pentes rocheuses.

SUMMARY

In this lecture the author has tried to discuss briefly the technical methods devised during recent years to determine the mechanical properties of rocks. He therefore chooses three particular cases, dam foundations, underground projects (tunnels, pressure tunnels, underground power plants), and slope stability, and he gives for each the recent methods which can be used to solve their particular problems.

The different methods of testing the characteristics of rocks both in the laboratory and *in situ* are listed. Of the former he reviews the tests for measuring compressive strength and creep, hardness, permeability (with special reference to the changes of permeability with the applied stresses), alterability, and the particular case of stratified materials. As for the *in-situ* tests, he cites those which should be made during the reconnaissance of the site, geophysical tests and measurements of strains under stresses, of the modulus of deformation at different depths, and of the shear stress of stratified soils. He then discusses how the results of these tests should be used in the design and gives different methods for checking the stresses and movements of the rock after completion of the structure.

Finally the author discusses several problems relating to the design of underground structures and he mentions the methods of measuring pressures on linings in different types of rock. He concludes with some information on the stability of slopes in rock.

LORSQUE M. LE PRÉSIDENT DU COMITÉ D'ORGANISATION de ce Congrès m'a demandé d'y faire une conférence sur la mécanique des roches, je me suis trouvé à la fois très honoré d'avoir été choisi et très embarrassé d'avoir à exposer en 50 minutes un sujet auquel une ou plusieurs sections de ce Congrès auraient pu être consacrées.

D'autre part j'avais eu l'occasion, au début de 1963, dans la Conférence Rankine que j'avais faite à Londres à l'Institution for Civil Engineers (Mayer, 1963), de présenter un exposé analogue et je me demandais ce que j'aurais à dire de nouveau. J'y avais, en effet, parlé des principales méthodes d'investigation mises au point en France au Laboratoire de mécanique des solides de l'Ecole polytechnique, en ce qui concerne les études de fluage, au Laboratoire de minéralogie de la Faculté des sciences de Toulouse, pour les études d'altérabilité des roches, enfin au Centre expérimental du Bâtiment et des Travaux publics, pour les mesures de module dans les sondages.

Il m'est apparu cependant qu'au cours de ces trois années des études nouvelles, de grand intérêt, avaient été faites. D'autre part, de nombreuses réunions avaient eu lieu dans le monde entier. Je ne réussirai pas à les citer toutes, mais j'aimerais rappeler au moins:

—celles, annuelles, qui ont lieu à Salzbourg, centrées autour du laboratoire du Dr Muller,*

—celles, nombreuses, qui ont eu lieu aux Etats-Unis et notamment celle de Santa Monica en 1963, le Colloque sur les Pressions de Terrains (mai 1964—New York), le Symposium de Rolla (Mississippi en octobre 1964) et probablement d'autres que j'ignore,

—le 3ème Symposium tenu à Toronto en janvier 1965, où on a pu apprécier le développement qu'avaient pris ces études dans le pays qui nous reçoit aujourd'hui,

—enfin, dans un autre hémisphère, la réunion qui s'est

*Voir les comptes rendus dans *Felsmechanik und Ingénieur Geologie* (Rock Mechanics and Engineering Geology) de 1963–6.

tenue à Adélaïde en 1963 et celles, périodiques, qui se tiennent en Afrique du Sud.

C'est dire l'intérêt que suscite dans le monde un ensemble de questions dont l'examen fera l'objet d'un Congrès International, à Lisbonne, en 1966. Et me souvenant de ce qu'était la tendance en 1963, j'ai dû constater une évolution certaine. Alors qu'à ce moment les différents chercheurs s'efforçaient de mettre au point des méthodes, tant au laboratoire que sur le chantier, on sort progressivement de ce stade pour aboutir à des techniques dont l'application systématique permet de résoudre les problèmes qui se posent à l'ingénieur de génie civil. C'est pourquoi je m'efforcerai de faire le point de l'état actuel de la mécanique des roches en passant en revue un certain nombre de problèmes et en rappelant les solutions adoptées pour les résoudre.

LES FONDATIONS DE BARRAGES

La reconnaissance de la fondation d'un ouvrage de retenue assis sur le rocher est peut-être, parmi les problèmes qui se posent en mécanique des roches, celui qui fait appel aux techniques les plus diverses. Car cette étude comprend la détermination de la qualité du rocher à l'aplomb de l'ouvrage et à l'emplacement des appuis, ainsi que la mesure de l'étanchéité de la fondation.

Sans nous attarder sur les méthodes classiques de prélèvement des échantillons, nous examinerons d'abord l'étude des propriétés caractéristiques de la roche telles qu'on les détermine au laboratoire, celles que l'on peut mesurer en place, et nous en indiquerons l'application dans l'étude des fondations de barrages.

Les Propriétés de la roche—Essais de laboratoire

La roche arrive au laboratoire sous forme de carottes extraites dans des sondages ou des emprunts. Sans parler de ses caractéristiques minéralogiques, qui relèvent d'une technique différente, passons en revue ses propriétés mécaniques et les modes de détermination.

La résistance à la compression, le fluage. La carotte extraite du forage est découpée et mise sous la presse où l'on détermine ses caractéristiques mécaniques, module élastique, coefficient de Poisson, résistance à la rupture en compression et en traction. Mais on peut aussi se demander ce que deviennent ces mêmes échantillons lorsqu'on les laisse sous charge pendant un certain temps. Une étude faite au Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique à Paris (Morlier, 1964) a montré que les roches pouvaient avoir différents comportements: élastique; visco-élastique, c'est-à-dire qui donnera des déformations partiellement réversibles seulement; visco-plastique où les phénomènes de rupture différée se produisent après des fluages souvent très importants. En réalité les questions de fluage n'interviendront que rarement dans l'étude des problèmes de fondations. Nous les retrouverons par contre dans l'étude des souterrains profonds.

Dureté—Forabilité. La connaissance de la dureté d'une roche et de sa résistance à l'outil de forage a fait l'objet d'études très intéressantes au laboratoire de la Sté N^le^ des Pétroles d'Aquitaine (Gstalder, 1965). L'inconvénient de ces études est que les mesures se font sur carottes extraites par forage, c'est-à-dire après que l'essai en vraie grandeur aura permis de connaître la vitesse d'avancement qui est en elle-même un renseignement extrêmement important sur la dureté de la roche et qui a l'avantage d'une détermination continue. De nombreuses corrélations notamment entre la vitesse d'avancement et la vitesse du son ont été trouvées au laboratoire. Ce sont malheureusement des résultats *a posteriori*, l'information originale étant obtenue lors de la reconnaissance, en cours d'exécution du forage.

Perméabilité—Variation avec les contraintes appliquées. Avec les essais de perméabilité et l'étude de ses variations sous contrainte, nous arrivons à des propriétés dont les études récentes ont marqué toute l'importance. Si dans une carotte cylindrique on fore un trou axial, on peut faire circuler un liquide à travers le matériau en produisant un gradient de pression de l'extérieur vers l'intérieur ou de l'intérieur vers l'extérieur. Ceci permet de mesurer deux valeurs de la perméabilité associées aux contraintes appliquées à l'échantillon, l'une en compression, l'autre en traction. Selon les échantillons, le rapport entre ces deux valeurs varie. Pour

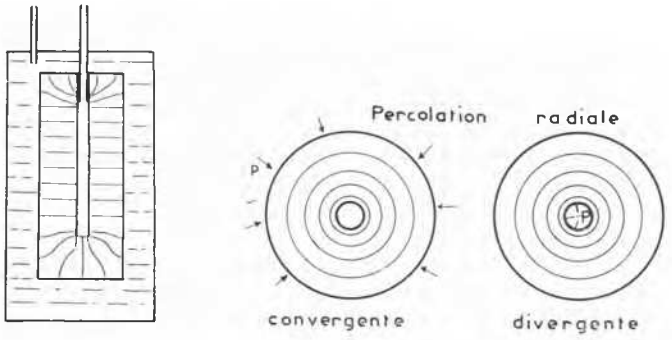

FIG. 1. Perméabilités en compression et en traction.

certains calcaires poreux non fissurés, dont la structure est indépendante des modifications de contrainte dans les limites de variations appliquées au cours des essais, le coefficient de perméabilité de la roche en compression est égal à celui de la roche en traction. Mais en général pour les roches habituelles où la structure est moins rigide et la fissuration plus fréquente, le rapport de perméabilité varie couramment entre 10 et 1000. Dans un seul cas particulier, mais vérifié pour une centaine d'échantillons au laboratoire, le rapport a atteint 10 000. Il est intéressant de noter qu'il s'agissait d'échantillons de gneiss provenant du site de Malpasset, dont les propriétés sont, de ce fait, apparues comme exceptionnelles (Bernex, 1966).

Microfissuration—Perméabilité à l'air. Les variations de la perméabilité en fonction des contraintes appliquées correspondent pour une part importante à l'apparition, sous l'effet des contraintes appliquées, de microfissures. Le

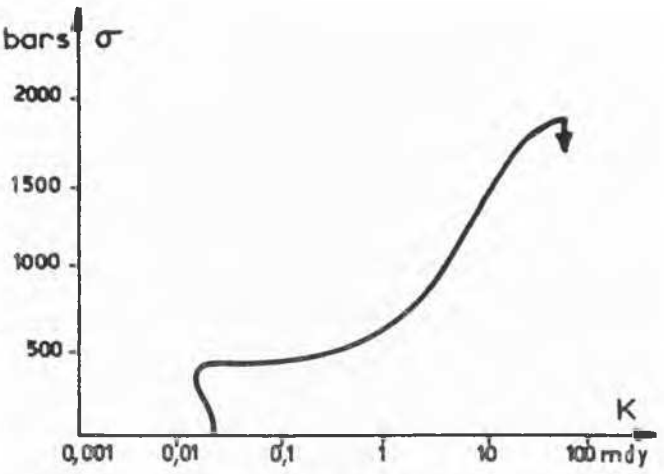

FIG. 2. Perméabilité sous charge croissante.

Laboratoire de Minéralogie de la Faculté de Toulouse a mis en évidence cette microfissuration par l'auscultation sonore d'échantillons dont on mesure en même temps la perméabilité à l'air (Farran, 1965; Pérami, 1965). On est arrivé ainsi à saisir les premiers effets de l'application aux roches de contraintes susceptibles d'amorcer des ruptures et cela à un moment où rien dans l'apparence extérieure des échantillons ne permettrait de deviner ce début de fissuration. Ces expériences ont mis en évidence la présence d'un seuil marquant le début de la microfissuration et qui s'inscrit nettement sur les courbes perméabilité–contrainte. Elles ont montré d'autre part que dans de nombreux essais la contrainte critique était inférieure au quart, parfois au cinquième de la contrainte de rupture. Le tableau I donne quelques valeurs du seuil de microfissuration de quelques roches. Ces mêmes essais ont montré que dans certains granites une partie de la microfissuration induite par la compression était réversible, que la microfissuration expliquait les phénomènes de fatigue sous l'effet de cycles répétés de compression–décompression dans des roches fragiles, enfin que dans le fluage des roches une partie au moins de la déformation sous charge constante correspondait à l'apparition d'une microfissuration avec apparition de vides.

Altérabilité. Les variations avec le temps de la perméabilité des roches constituent une mesure de leur altérabilité. Si la perméabilité reste constante, c'est que le passage de l'eau ne produit aucune dissolution. Si au contraire elle augmente ou diminue, c'est que l'eau produit une modification de la roche, que celle-ci est altérable. Dans les granites, s'il y a attaque, il y a dissolution de la silice qui se dépose après un certain temps de parcours en obturant les vides les plus petits. La perméabilité diminue. La roche est altérable. Dans les calcaires, l'effet serait inverse; la perméabilité augmenterait avec le temps s'ils sont altérables. Cette méthode a été appliquée depuis de nombreuses années par le Laboratoire de minéralogie de Toulouse pour classer les roches rencontrées par l'Electricité de France dans la perforation des galeries destinées à être mises en charge et pour décider de la nécessité des revêtements en béton. Divers essais ont été effectués dans une même galerie pour classer les roches rencontrées et des sections de cette galerie ont été exposées sans revêtement à l'action de l'eau. Il est apparu qu'après quelques mois ces diverses sections se classaient quant à l'altérabilité comme l'avait indiqué le laboratoire et que celles reconnues comme très altérables devaient être revêtues immédiatement sous peine de dégradation rapide. Je rappellerai sur le tableau II les comparaisons entre la variation de la perméabilité et les constatations faites sur place telles qu'elles ont été données par M. le Professeur Farran. Signalons ici encore que de toutes les roches examinées par le laboratoire, le gneiss de Malpasset s'est avéré de beaucoup le plus altérable.

Mesure de célérité des ondes sonores. La célérité des ondes sonores est un moyen commode pour évaluer la qualité des roches tant au laboratoire qu'en place. La même méthode permet d'ailleurs, en comparant la célérité correspondant à un échantillon sous charge et non chargé, d'avoir une valeur approximative des contraintes appliquées du fait des charges ou des contraintes tectoniques. Les essais faits au Laboratoire de mécanique des solides de l'Ecole polytechnique ont montré en effet que si l'on faisait varier les contraintes appliquées à un échantillon, la vitesse du son variait considérablement. Dans le cas d'un quartzite très compact comme celui de Tignes et pour un échantillon cylindrique

TABLEAU I

Nature	Perméabilité initiale, P_0 (mdy)	Perméabilité au seuil (mdy)	Perméabilité en cours de microfissuration (mdy)	Contrainte au seuil, C_s(hpz)	Résistance R_c (hpz)	$\frac{C_s}{R_c}$ (%)
Granite à amphibole	0,035	0,024	0,800	500	2000	25
Granite à amphibole	0,040	0,034	0,730	400	2000	20
Granite	0,016	0,012	0,13	400	1600	25

TABLEAU II

Repère et origine	Perméabilité apparente à l'air (mdcy)	Porosité relative (%)	Observations *in situ* concernant l'altération
gneiss du Lanoux (P.O)	0,0020	0,40	cette roche ne s'altère pas
granite de la galerie de Luzières-amont (Tarn)	0,0050	0,40	idem
granite de la Ravège (Tarn)	0,033	0,70	idem
granite de Tolla (Corse)	0,073	0,75	idem
granite de Montpezat Rieutord (Loire)	0,12	2,8	cette roche s'altère et s'arénise rapidement
granite de l'estuaire de la Rance	0,30	1,5	cette roche s'altère mais plus lentement que 5 et 7
granite de la galerie de Luzières-aval (Tarn)	0,58	9	cette roche s'altère et s'arénise rapidement et totalement

auquel on applique une pression transversale de 250 bars, la vitesse du son passe de 4 000 à 6 000 m/sec lorsque la contrainte longitudinale appliquée passe de 0 à 1 000 bars. Nous verrons plus loin l'application *in situ* de ce résultat expérimental.

Teneur en eau. L'influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression, connue depuis longtemps, a été confirmée au Laboratoire de mécanique des solides et on a retrouvé, dans le cas de roches d'apparence compacte, ce que l'on savait dans le cas de matériaux comme la craie, dont la résistance est essentiellement fonction de la teneur en eau. Certaines études faites par M. Colback (1965), en Afrique du Sud, opérant sur des matériaux siliceux, ont fait apparaître des changements considérables de résistance pour des variations de teneur en eau correspondant à des modifications extrêmement réduites de l'humidité relative de l'air dans lequel avait lieu l'essai.

Etude des matériaux stratifiés. Nous avons indiqué que le laboratoire s'attachait, dans certains cas, à mettre en évidence la microfracturation. Mais il est un autre aspect de la fracturation, la stratification, qui joue un rôle considérable en mécanique des roches et dont certains laboratoires tels celui de MM. Muller et Pacher à Salzbourg, et celui de

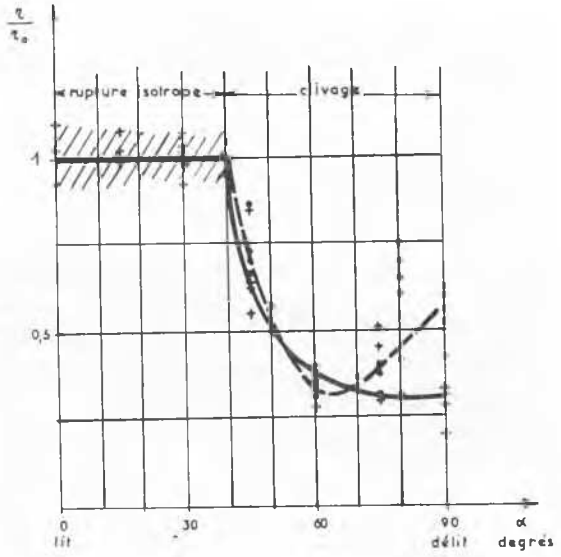

FIG. 3. Variation de la résistance à l'écrasement en fonction de la direction de la contrainte.

l'Institut polytechnique de Grenoble (More et Sirieys, 1965), ont abordé l'examen. Le problème étudié est celui de la rupture de matériaux stratifiés; on reproduit ceux-ci au laboratoire au moyen de parallélipipèdes homogènes, sciés, puis recollés selon des lits parallèles grâce à des mortiers à dosage en ciment variable, et on les soumet à des compressions mono-axiales sous des orientations différentes selon la stratification. M. Sirieys a montré que les conditions de rupture variaient en fonction de l'angle α entre la normale aux plans de stratification et la direction de la contrainte. Jusqu'à une certaine valeur de cet angle, correspondant à l'angle de frottement du matériau de remplissage des strates, le matériau se comporte comme un matériau homogène et la résistance à l'écrasement est constante. Ensuite la résistance varie et passe par un minimum. La rupture s'effectue alors le long d'une ligne brisée suivant les plans de stratification, la ligne de rupture dépendant des caractéristiques du liant, cohésion et angle de frottement. Cette étude, qui n'a jusqu'ici

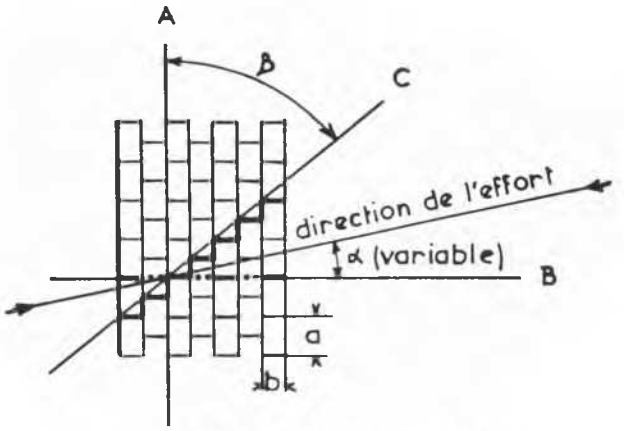

FIG. 4. Rupture d'un massif stratifié.

été qu'abordée, paraît susceptible d'être transposée en place et de permettre l'explication de ruptures constatées sur le terrain, qui n'ont pas été analysées jusqu'ici.

Observations et essais en place

Si pour la commodité de la présentation, nous avons commencé par énumérer les propriétés des roches telles qu'on les étudie au laboratoire, c'est en place durant l'étude géologique et stratigraphique, et au cours des sondages de reconnaissance, que l'ingénieur prendra contact avec le terrain et s'efforcera d'obtenir tous les renseignements utiles. Rappelons les méthodes d'investigation maintenant classiques.

La Reconnaissance

Nous avons vu par les résultats des essais de laboratoire l'importance d'une connaissance exacte de la stratigraphie du rocher. Elle se détermine d'abord par l'observation directe au cours de la reconnaissance géologique qui précède l'étude géotechnique. On confirme les indications obtenues par l'examen des sondages et des galeries de reconnaissance. La détermination de la cohésion et du frottement le long des plans de stratification peut également faire l'objet d'essais en vraie grandeur. La fracturation ressort des études géophysiques ainsi que d'essais en sondages. L'ensemble de ces éléments permet, au moyen d'études sur modèles, d'examiner les conditions de stabilité d'ouvrages ou de terrains naturels, qu'il s'agisse des rives d'une retenue, des appuis d'un barrage ou de talus surmontant une route.

Mesure de la vitesse du son dans les massifs—Fracturation. L'expérience prouve que la vitesse de transmission des ébranlements est une mesure du module de déformation moyen de la roche, c'est-à-dire bien souvent de sa fissuration. La géophysique permet, d'une façon générale, de distinguer entre les zones fracturées superficielles et le massif compact en profondeur. C'est par cette étude qu'il convient de commencer en place pour avoir des indications générales sur le site.

Récupération et perméabilité. Les sondages constituent la partie onéreuse du travail de reconnaissance. Il convient donc de tirer de chacun d'eux tous les renseignements possibles. Lorsqu'on dispose de l'appareillage nécessaire et que les sondages ont un diamètre suffisant, il est intéressant de pouvoir examiner les parois du trou, soit en les photographiant, soit au moyen d'un appareil spécial de télévision qui permet l'examen visuel direct. Sinon on se contente de relever en cours de descente le pourcentage de récupération, la nature et l'aspect général des carottes extraites en même

temps que l'on mesure la perméabilité du terrain par injection d'eau sous pression. Cette perméabilité se définit en unités Lugeon, c'est-à-dire par l'absorption en litres par minutes par mètre de forage sous une pression de 10 bars. Enfin, dès que les sondages ont un diamètre de l'ordre de 80 à 100 mm il est très utile de faire, au moyen d'un appareil spécial, des mesures de module de déformation à différents niveaux. Nous y reviendrons plus loin.

Les Mesures de contraintes—Gravité et contraintes tectoniques. Un élément important dans la reconnaissance d'un massif rocheux est la détermination de la direction et de la valeur des contraintes qui règnent à l'intérieur du massif. Ces contraintes peuvent, dans certains cas, être simplement l'expression de la charge des couches supérieures.

Il en sera ainsi dans les terrains sédimentaires qui n'ont pas été perturbés par des plissements postérieurs à leur dépôt et dont les couches sont par conséquent horizontales. Au contraire, dans les terrains sédimentaires plissés ou les terrains métamorphiques, les mouvements de l'écorce terrestre ont pu engendrer des contraintes différentes de celles dues à la seule gravité. Leur existence et la relaxation brusque de la roche le jour où par suite de la mise à nu d'une rive de canal ou d'une paroi de tunnel, elles seront supprimées dans une certaine direction, risquent de provoquer des surcharges locales ou des efforts de traction. Ceux-ci produiront des "coups de charge" dans les mines ou des fissures de décompression dans les appuis de barrage.

La seule méthode directe pour la mesure des contraintes est celle du vérin plat (Mayer, Habib et Marchand, 1951). Elle date d'une quinzaine d'années et est couramment appliquée dans différents pays. Elle permet la mesure des contraintes dans un massif au voisinage d'une paroi, dans une direction quelconque. Pour cela on définit tout d'abord la direction de mesure et on trace une ligne perpendiculaire à cette direction le long de laquelle on implantera le vérin plat. Normalement à cette ligne, on implante plusieurs séries de repères et on note l'écartement de ces repères deux à deux. Puis le long de la ligne définie initialement on découpe dans le rocher une rainure dans laquelle on introduit le vérin plat que l'on scelle, soit au mortier, soit à la résine selon que la roche est ou non sensible à l'eau.

On établit dans le vérin une pression qui reproduit entre les couples de repères l'écartement initial. De nombreux essais sous charge contrôlée ont montré que la pression était celle qui règnait dans le massif avant la mise en place du vérin. On peut ainsi mesurer la contrainte en surface, parallèle à la face d'une excavation ou à la paroi d'un tunnel. En plaçant le vérin en surface d'abord, puis au fond d'un rameau de faible section, on a une approximation suffisante de la pression qui s'exerce normalement à la paroi et de celle que l'on a dans le massif, en profondeur. Pour l'interprétation de ces essais il faut se souvenir qu'en élasticité à deux dimensions, si on perce un trou dans une plaque sous charge unidirectionnelle, la contrainte le long de la tangente à l'excavation parallèle à la charge est égale au triple de la charge moyenne sur la plaque.

A trois dimensions, si on a une pression verticale uniforme P_v et une pression horizontale P_h parallèle à la direction de la galerie, la contrainte verticale N_θ tangente à la paroi est liée aux pressions P_v et P_h par la formule $N_\theta = 3P_v - P_h$. C'est-à-dire que l'on devrait normalement, si le creusement même de la galerie dans laquelle se font des mesures n'avait pas produit une fissuration qui réduit le module de déformation, avoir en surface des contraintes très supérieures à ce qu'elles sont à l'intérieur du massif. Nous verrons, lorsque nous traiterons des applications de la mécanique des roches dans l'appréciation de la stabilité des galeries et cavités souterraines, qu'il n'en est pas toujours ainsi.

Le Module de déformation de la roche. Lorsque l'on veut appliquer au rocher, comme on le fait pour des barrages voûtes, des charges qui atteignent et dépassent 50 bars, il est important de connaître la déformation correspondante. Celle-ci est fonction de la fissuration locale. Il est donc important, dès la reconnaissance, de se rendre exactement compte de la variation du module de déformation en fonction de la profondeur et de la direction dans laquelle s'exerceront les contraintes. Nous avons eu l'occasion, au

FIG. 5. Cellule de mesure de déformation sous charge du C.E.B.T.P.

FIG. 6. Cellule de mesure de déformation sous charge du C.E.B.T.P.

Congrès des Grands Barrages d'Edimbourg, de présenter un appareil, mis au point par le Centre d'études du Bâtiment et des Travaux publics, qui permet de mesurer le module dans des sondages de diamètre courant, de 76 à 86 mm de diamètre (3 po à 3½ po).* Je n'en reprendrai pas la description. Depuis, l'Electricité de France a étudié un autre appareil qui peut être utilisé dans des sondages de 160 mm au moins (Comès, 1965). Des appareils de ce type peuvent être mis en œuvre dès la reconnaissance. Si on les emploie dans des sondages plus ou moins inclinés et ayant des orientations différentes, ils rendent compte de la fracturation de la roche en profondeur et de son anisotropie éventuelle.

*"Mesure des modules de déformation des massifs rocheux dans les sondages, par un Groupe de travail du Comité National français des Grand Barrages," *Comptes Rendus du 8ème Congrès des Grand Barrages*, Edimbourg, 1964—Question 28, Rapport 16.

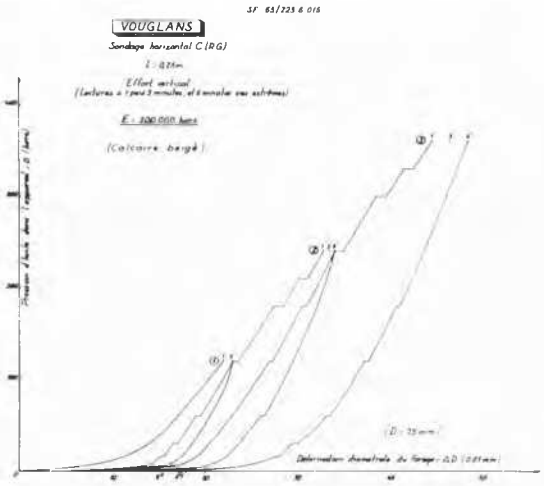

FIG. 7. Diagrammes contrainte–déformation—Barrage de Vouglans.

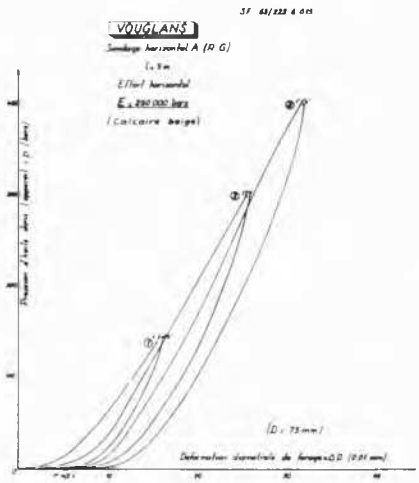

FIG. 8. Diagrames contrainte–déformation—Barrage de Vouglans.

Dès les premiers essais, dans un gneiss assez fissuré, on a pu se rendre compte de la décompression de la roche en direction de la rive d'une vallée et de l'amélioration progressive du matériau en profondeur. Depuis, les essais exécutés sur divers emplacement en cours de reconnaissance ont donné des résultats qui imposeront dans l'avenir l'utilisation dans les sondages d'appareils de ce type.

La Résistance au cisaillement en terrain stratifié. Les essais de laboratoire ont montré l'importance que prenait la résistance au cisaillement de la roche en place lorsque les contraintes extérieures faisaient avec la normale au plan de stratification un angle supérieur à 30°. Il est donc essentiel de compléter les mesures de cisaillement au laboratoire par des essais en vraie grandeur exécutés sur le terrain. Ces essais impliquent, chaque fois, que l'on dégage un parallélipipède reposant à sa base sur un plan de stratification, et qu'on provoque son déplacement par glissement au moyen de vérins. La méthode est théoriquement très simple. Malheureusement elle est onéreuse, si bien qu'on ne répète que rarement l'essai assez souvent pour être certain d'avoir une valeur qui puisse être considérée comme vraiment représentative.

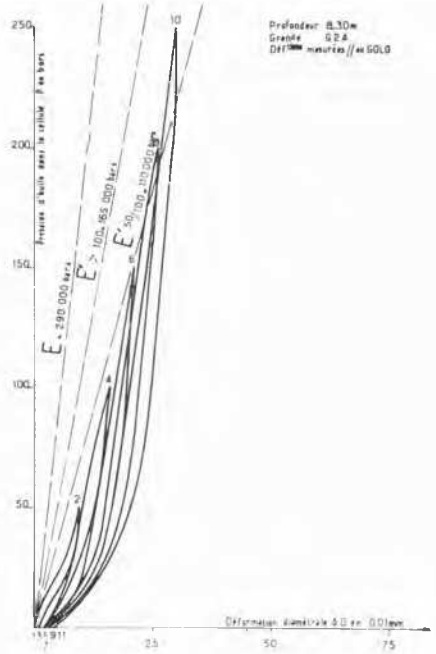

FIG. 9. Diagramme contrainte–déformation—Barrage de Calacuccia.

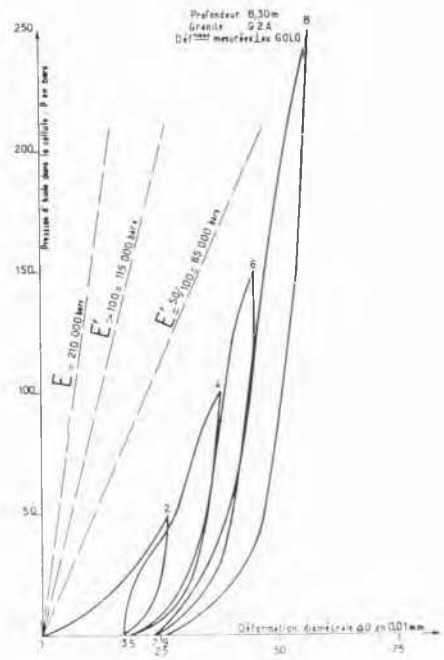

FIG. 10. Diagramme contrainte–déformation—Barrage de Calacuccia.

Le Projet—Application des résultats

Tous les résultats trouvés au cours des essais ont leur application lors de l'élaboration du projet. La fissuration superficielle conditionnera la profondeur à laquelle devra être assise la fondation, le module de déformation, le comportement à prévoir sous la charge, c'est-à-dire la largeur à donner à l'assiette. La présence de fissures dans les appuis pourra nécessiter leur consolidation par injections ou par ancrages.

Quant aux mesures de la perméabilité et de ses variations en fonction des contraintes appliquées, elles détermineront les conditions dans lesquelles réagira le rocher en fonction de la charge résultant du remplissage de la retenue. Je ne considérerai pas ici le cas, qui relève d'études et de techniques particulières, où la fissuration comme il arrive dans les terrains karstiques est telle que des fuites se déclarent dans la retenue. L'importance des vides souterrains rend alors impossible un étanchement de la masse par les méthodes usuelles d'injection et il faut recourir à des remèdes superficiels, tels que des tapis étanches sur filtre, en argile ou en matière plastique. Dans le cas général la charge aura pour effet de faire travailler en traction les roches situées en amont de la fondation et en compression celles situées en aval. S'il s'agit d'un rocher dont la perméabilité augmente sous l'effet de contraintes de traction, on doit s'attendre à ce que les fissures du rocher à l'amont du barrage s'ouvrent et se gorgent d'eau en charge, tandis que celles, immédiatement à l'aval, se refermeront et que la zone correspondante deviendra absolument étanche. Il suffira alors de la présence d'une fracture située à l'amont et mal placée pour avoir un effet de vérin qui risque de détacher des pans de rocher tout entiers.

Le type d'une roche susceptible d'accidents de ce genre est celui du gneiss de Malpasset, dont la perméabilité en traction était, comme il a été dit, 10 000 fois celle du même matériau en compression, résultat qui n'avait jamais été trouvé sur aucun autre échantillon essayé au laboratoire.

Si l'on avait eu lors des études de Malpasset les connaissances que l'on a actuellement, des résultats aussi exceptionnels n'auraient pas manqué d'attirer l'attention et l'auteur du projet aurait prévu, à l'aval de l'ouvrage et dans les appuis, des drains suffisants pour éviter les sous-pressions qui ont été à l'origine de la catastrophe.

L'Auscultation du massif rocheux

Si les essais préalables conditionnent le projet, d'autres essais permettront, une fois l'ouvrage terminé, de vérifier le comportement du rocher et de s'assurer de la concordance des prévisions du projeteur et de l'expérience. Nous en citerons deux qui ont déjà donné des résultats intéressants.

Le premier est une application de ce qui a été dit plus haut sur les variations de la vitesse de propagation des ébranlements dans le rocher avec la contrainte appliquée. On mesure la célérité du son dans les appuis avant le remplissage de la retenue, après celui-ci, et de nouveau après une vidange. L'expérience faite au barrage de Roujanel pour le compte d'Electricité de France, par M. Bollo et son équipe, a montré que l'on éprouvait par cette méthode le comportement élastique des appuis de l'ouvrage, tout au moins dans le cas considéré.

Une autre méthode qui permet la mesure des déformations du massif rocheux reprend une technique employée en Afrique du Nord par M. Drouhin il y a plus de 30 ans, et qui est utilisée par le Professeur Potts dans les mines de Grande-Bretagne pour suivre les déformations des piliers pendant l'exploitation. On mesure sous tension constante la variation de longueur d'un fil d'acier invar scellé au fond d'un forage par rapport à une collerette fixe (Habib et Duffaut, 1965).

Un dispositif de ce type a déjà été installé dans les fondations de deux barrages. On en a prévu l'utilisation pour ausculter les fondations du grand barrage-voûte de Vouglans actuellement en construction sur l'Ain.

On voit que les essais de mécanique des roches, tant au laboratoire qu'*in situ*, ont trouvé leur place dans la technique d'étude et de construction des barrages. Il est à souhaiter que les ingénieurs chargés des études se familiarisent rapidement avec ces méthodes qui doivent, dans tous les cas, au moins attirer l'attention sur les cas particuliers qui nécessitent des précautions spéciales.

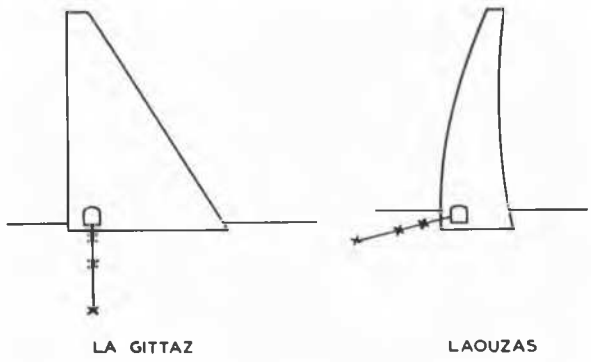

FIG. 11. Déplacements d'un ouvrage sous charge.

TUNNELS, GALERIES EN CHARGE, USINES SOUTERRAINES

Les méthodes dont le principe a été exposé trouvent aussi leur application dans l'étude des travaux souterrains, que ce soient des tunnels, des galeries ou des usines souterraines. Les caractéristiques des roches indispensables à connaître sont ici: leur nature, leur résistance à la compression et à la traction, leur comportement sous charge, élastique ou élastoplastique, la perméabilité à l'état naturel et sous charge, l'altérabilité. Il faut déterminer aussi les contraintes appliquées qui peuvent résulter, soit des charges, soit de mouvements tectoniques. Nous avons rappelé plus haut comment on les mesure. Nous examinerons ici les différents problèmes qui se posent selon que l'on est dans un rocher dur et compact, dans une roche tendre, sensible aux effets de l'eau, ou dans des matériaux susceptibles de gonfler, marnes, argiles ou anhydrite. Ces problèmes sont, aussi bien dans le cas des tunnels, des galeries ou des excavations destinées à recevoir les usines souterraines, la stabilité des parois, la nécessité d'un revêtement, les pressions que ce revêtement aura à supporter.

MESURE DES CHARGES

Cas des roches dures

Le cas le plus courant est celui des roches compactes et résistantes. La question de la stabilité de la paroi des excavations ne se pose que lorsque le recouvrement a une hauteur importante.

Dans le cas du tunnel du Mont-Blanc, par exemple, le recouvrement en moyenne est de 2 000 m. La densité de la roche est de 2,7, c'est-à-dire que la charge moyenne P_v est de 540 bars. La résistance à la compression de la roche, un type de granite caractéristique dénommé protogyne, est comprise entre 1 000 et 1 200 bars. Si l'on admet que la contrainte horizontale dans le massif est égale à la moitié de la contrainte verticale, on voit que dans l'axe de la section droite du tunnel, où la tangente à la paroi est verticale, la contrainte tangentielle a pour valeur

$$N = 3\,P_v - P_h = P_v\,(3 - \tfrac{1}{2}) = 2{,}5 \times 540 = 1\,350 \text{ bars.}$$

On peut s'attendre à des ruptures de la roche dans le plan horizontal de l'axe de la galerie. C'est bien d'ailleurs ce que l'on a constaté. Pour y parer il a fallu poser tout le long de

la paroi du tunnel, dans la région des fortes charges, des boulons qui ont produit le long de la paroi des contraintes dirigées vers l'intérieur du massif, c'est-à-dire qui ont augmenté très sensiblement la résistance de la roche.

Des problèmes analogues se posent dans les mines, notamment dans les mines profondes d'Afrique du Sud où la charge sur le front dépasse la résistance à la compression de la roche, ce qui se traduit par des coups de charge, souvent meurtriers.

Des concentrations de charges élevées ont également été mesurées dans des travaux de génie civil, en des points particuliers d'excavations souterraines. L'étude très complète en a été faite en particulier en Australie lors de la construction de l'usine de Tumut 2, qui fait partie de l'aménagement des Snowy Mountains (Pinkerton et Gibson, 1964; Alexander, 1963).

Des mesures au vérin plat, faites lors du creusement de la galerie de reconnaissance avaient permis d'obtenir les valeurs des contraintes règnant dans le massif, avant tout creusement. Celles-ci avaient servi de base à une étude photoélastique à deux dimensions sur modèle réduit. Des mesures, faites en place en cours d'exécution et après achèvement de l'ouvrage ont fait apparaître une concordance satisfaisante avec les valeurs déterminées sur le modèle. La stabilité des parois de l'excavation a pu être obtenue grâce à une combinaison d'ancrages et de forages drainants destinés à la fois à consolider et à décomprimer le massif. Cette application du vérin plat a montré qu'on pouvait l'utiliser dans un domaine de pression où jusqu'ici nous n'avions pas eu l'occasion de l'employer. Des essais analogues sont prévus par l'Electricité de France à Vouglans lorsque les travaux seront assez avancés.

Cas des roches tendres

Mais les mêmes méthodes peuvent également donner des renseignements précieux dans des massifs de roche tendre où les contraintes à la paroi ne sont pas celles qui résulteraient des formules de l'élasticité. Nous citerons à titre d'exemple une étude qui a été faite dans une carrière souterraine de craie de la région parisienne pour déterminer la stabilité des piliers et savoir si l'on pouvait sans danger prévoir des constructions en surface. Une première série de mesures a été faite dans les conditions habituelles au vérin plat avec scellement au plâtre dans la craie. Les contraintes verticales à la paroi, au lieu d'être au moins doubles de la contrainte verticale moyenne, calculée d'après la hauteur du revêtement et la proportion de vides et de pleins, lui étaient très inférieures.

C'était la preuve qu'au voisinage des parois la craie ne se comportait pas élastiquement, que du fait précisément des contraintes qui s'étaient produites lors du travail d'excavation la craie s'était fissurée jusqu'à perdre sa résistance. On fit alors une deuxième série d'essais en prenant soin d'isoler par une enveloppe plastique le plâtre de la craie. On constata des contraintes beaucoup plus fortes, montrant que la plus grande partie de la chute de pression tenait au processus expérimental, l'eau de gâchage du plâtre ayant eu pour effet de ramollir la craie au contact de la fente.

Malgré cette correction, les valeurs des contraintes au voisinage de la paroi n'atteignirent pas les valeurs qu'elles auraient eu en régime élastique. Par contre les mesures d'écrasement faites en poussant la pression dans les vérins montrèrent que si l'on était dans une zone de comportement élastoplastique on n'en était pas moins loin de la charge de rupture, et que la stabilité était assurée.

Cas des marnes et argiles

Un cas particulier qui est à la limite de la mécanique des sols et des roches est celui de certaines marnes et argiles.

Nous avons eu l'occasion d'étudier un tunnel traversant les marnes du Keuper. A l'état intact dans le massif, ces marnes avaient un module de déformation de l'ordre de 100 000 kg/cm.cu. une résistance à la compression de 100 bars, caractéristiques qui correspondent à une roche tendre. Par contre, mises au contact de l'eau, à l'œdomètre, elles avaient une pression de gonflement de 10 à 20 bars et, après exposition à l'eau et à l'air, elles se désintégraient complétement, perdant toute cohésion et n'ayant plus qu'un angle de frottement d'une vingtaine de degrés.

Il fallait évidemment les isoler du contact de l'air dès leur mise à nu, ce qu'on fit au moyen d'un enduit étanche suivi d'un revêtement gunité, et s'opposer au gonflement superficiel par des ancrages scellés à la matière plastique, sans eau, pour éviter d'introduire de l'eau dans la marne (Tincelin, Sinou et Léonet, 1965). On compte dans ces conditions pouvoir sans danger attendre le moment où on posera le revêtement définitif.

Reste à savoir quelle sera la pression finale que cette marne exercera sur le revêtement. Seuls des essais comportant la mise en place de vérins plats munis de manomètres derrière un revêtement permettront de le savoir. En attendant il a fallu extrapoler des essais exécutés ailleurs, en particulier au tunnel de Monte-Carlo par la Société Nationale des Chemins de Fer français (Habib, Bernède et Carpentier, 1965). Ces essais, faits dans une marne moins plastique que celle rencontrée dans le tunnel considéré, et sur un revêtement d'un type spécial, comportant à la clé une section en voussoirs préfabriqués, ont montré que la pression finissait par se stabiliser, au bout de plusieurs années, et que sa valeur maxima ne dépassait pas la moitié de la contrainte verticale moyenne, en raison de la formation de voûtes à l'intérieur du massif. Nous comptons faire des mesures aussitôt que le travail le permettra et espérons avoir des résultats qui donneront la possibilité d'opérer à l'avenir avec plus de sécurité.

Fluage

Nous avons indiqué que le fluage était une propriété spécifique de certaines roches mises sous charge au-delà de leur limite élastique pendant un temps prolongé. Le fluage n'est pas sensible lorsqu'il s'agit de roches dures et fragiles dont la limite élastique est voisine de la limite de rupture. Dans ce cas l'approche de la rupture peut être mise en évidence par les méthodes acoustiques qui manifestent la microfissuration de la roche longtemps avant que l'on ait atteint la limite.

Dans les terrains tendres au contraire, la déformation des parois des excavations creusées, qui se manifeste par le rapprochement du toit et du mur de celles-ci, a été désignée sous le nom de convergence et est très étudiée dans les mines (Schwartz, 1960). Ces études peuvent également s'appliquer lorsque l'on a à creuser des excavations souterraines dans les travaux publics. L'observation de la convergence donne alors un indice de la stabilité du massif et permet de prévoir les accidents. Les méthodes d'observation sont simples et comportent la lecture des variations de longueur d'un fil invar ancré au toit et que l'on tend au moyen d'un poids. Un repère scellé au mur permet les observations.

Le critère de la convergence est surtout intéressant dans les galeries ou excavations temporaires où un revêtement permanent serait souvent une dépense inutile. Il attire

l'attention sur le danger d'effondrement longtemps avant que celui-ci apparaisse à l'observateur.

Altérabilité

Nous avons indiqué que les essais de perméabilité à l'air faits au laboratoire sur des échantillons de granite donnaient une indication sur l'altérabilité de la roche au contact prolongé d'eau et d'air. La mise au point de ces essais au Laboratoire de minéralogie de Toulouse a permis à Electricité de France de faire déterminer d'une manière systématique l'altérabilité des roches rencontrées dans les galeries souterraines. Des essais exécutés au barrage de Bort où des roches classées comme altérables avaient été laissées sans revêtement dans des galeries en charge ont montré rapidement une désintégration superficielle et ont nécessité la pose d'un revêtement protecteur. Depuis ce moment cet essai est exécuté par Electricité de France de façon systématique toutes les fois que la question de la pose d'un revêtement dans une galerie se présente.

STABILITÉ DES PENTES

Le problème de la stabilité des pentes est l'un de ceux qui se posent le plus souvent en mécanique des roches. L'importance des études qui ont été faites à ce sujet, notamment en Autriche, en rend difficile l'exposé dans le temps réduit dont je dispose. Mais c'est aussi l'un de ceux où l'ingénieur se trouve souvent le plus désarmé devant la gravité et les répercussions des décisions à prendre. Il suffit de rappeler la catastrophe de Vajont et la rupture d'équilibre brutale de la rive gauche de la retenue, dont on suivait cependant les mouvements depuis plusieurs années (Muller, 1964).

Prenons le cas le plus simple des terrains stratifiés, sans contraintes tectoniques internes. Le laboratoire a montré que ces terrains se comportaient comme des roches homogènes aussi longtemps que l'angle du plan de stratification sur l'horizontale n'était pas plus grand que l'angle de cisaillement du matériau mesuré suivant une surface de stratification. A partir de ce moment deux cas peuvent se produire. Aussi longtemps qu'il n'y a pas mouvement, le frottement n'entre pas en jeu. Seule la cohésion de la masse assure sa stabilité. Mais dès qu'il y a mouvement, c'est que la cohésion est surmontée; c'est la résistance au cisaillement dans les différents plans de stratification qui joue.

Cette résistance peut se déterminer expérimentalement, si on peut découper dans la roche des échantilons intacts de grande dimension. Elle varie beaucoup selon la matière qui remplit les fissures, argile comprimée ou matériaux meubles, sables et gravillons. Mais dans tous les cas l'équilibre peut s'étudier selon les méthodes de la mécanique des sols en recherchant la ligne de glissement la plus probable.

Bien entendu, comme en mécanique des sols, il faut tenir compte des sous-pressions, notamment dans le cas d'une baisse rapide du plan d'eau dans la retenue d'un barrage ou de l'infiltration d'eau de ruissellement qui viendrait se mettre en charge dans les fissures de la roche. La règle à adopter dans l'appréciation de la stabilité de talus constitués par des terrains stratifiés, inclinés vers le vide, est donc de rechercher tout d'abord l'inclinaison de la pente et de voir comment elle se classe par rapport à l'angle de frottement des éléments qui remplissent les fractures. S'il y a danger de glissement, on placera des repères topographiques de manière à déterminer s'il y a mouvement. S'il n'y a aucun déplacement sensible, c'est que la cohésion s'y oppose. Le mouvement sera l'indice d'une destruction de la cohésion, c'est-à-dire que malgré le caractère de roche du matériau, celui-ci se comportera, du fait de sa fracturation, comme un sol non cohérent dont on pourra déterminer les conditions d'équilibre par les méthodes classiques. Si la pente n'est pas stable, on peut la stabiliser au moyen d'ancrages donnant à un ensemble de bancs la cohésion qui leur manque.

Mais ce n'est là qu'un cas particulier relativement simple. Dans toutes les roches dont la fracturation est irrégulière, la définition de la stabilité des pentes est beaucoup plus difficile. A la limite on pourrait considérer les massifs comme constitués par des éléments anguleux imbriqués, superposés, l'ensemble n'ayant pas de cohésion, mais un angle de frottement élevé, de l'ordre de 50 à 60° par exemple. Dans ce cas le calcul de la stabilité se ferait par les méthodes de la mécanique des sols. Pour obtenir une consolidation il faudrait combiner les drains, qui réduisent les sous-pressions, et les ancrages, qui donnent de la cohésion. Ce sont là des indications d'ordre général, qu'il est difficile de préciser autrement que par des exemples. Chaque problème nécessite en effet une étude en soi, qui met en jeu toutes les caractéristiques de la roche.

L'utilisation des ordinateurs a permis, en particulier à M. Londe, ingénieur au Bureau d'études Coyne et Bellier, d'étudier la stabilité d'appuis de barrages dans l'hypothèse où ceux-ci sont limités par des plans de diaclases (Londe, 1965). Dans d'autres cas la connaissance des contraintes tectoniques dans les roches permet de prévoir les fissures de décompression et les mesures à prendre pour en tenir compte.

On voit combien il importe d'avoir toutes les données que les techniques actuelles permettent de rassembler pour résoudre les problèmes particuliers. Même en disposant de renseignements précis, il est des cas nombreux où l'ingénieur de génie civil doit se contenter de solutions approchées, l'hétérogénéité des massifs naturels et leur fracturation rendant impossible les solutions rigoureuses, basées sur un raisonnement mathématique qui implique la continuité de la matière.

Nous avons jusqu'ici examiné trois cas d'application des techniques de la mécanique des roches, les fondations de barrages, la stabilité des souterrains, l'équilibre des pentes. Une revue complète en impliquerait beaucoup d'autres et notamment les techniques d'utilisation des explosifs, celles-ci allant jusqu'à l'emploi des explosions atomiques dans les travaux publics. Une étude comportant le dépouillement de plusieurs milliers de tirs est en cours dans les mines de fer de France et doit être présentée dans un prochain congrès. Ce m'est une excellente raison de ne pas aborder un sujet que je n'aurais d'ailleurs pas le temps de développer.

En terminant cet exposé, je voudrais remercier tous ceux qui m'ont communiqué les résultats de leurs travaux et m'ont autorisé à les utiliser, et en particulier M. P. Habib, Directeur-adjoint du Laboratoire de mécanique des solides à l'Ecole polytechnique, M. P. Duffaut, Ingénieur chargé des études géotechniques à l'Electricité de France, M. le Professeur Farran, qui dirigeait jusque tout récemment le Laboratoire de minéralogie de la Faculté des sciences de Toulouse, M. Sirieys, de l'Université de Grenoble, M. Bollo et la Société de Recherches géophysiques qu'il dirige, le Centre expérimental du Bâtiment et des Travaux publics et M. Bernède, Chef de la Section mécanique des roches, ainsi que le Bureau d'études Coyne et Bellier où M. Londe est chargé de suivre les questions qui font l'objet de cet exposé. Je m'excuse d'avance de ce que cette énumération aura certainement d'incomplet.

Je veux enfin remercier M. Robert Legget, Président, et le Comité d'organisation du Congrès, qui ont si aimablement insisté pour que je fasse cet exposé.

RÉFÉRENCES

ALEXANDER, L. G. (1963). Field and laboratory tests in rock mechanics. *Trans. 3rd Australian New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.*

BERNEX (1966). Étude des variations de la perméabilité des roches sous contraintes. Thèse de doctorat.

COLBACK, P. S. B. (1965). *The Influence of Moisture Content on the Compressive Strength of Rock.* Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, S.A.

COMÈS, M. (1965). *Dilatomètre mobile pour mesures en sondages.* Rapport au Groupe de Travail de Mécanique des Roches du Comité Français des Grands Barrages, juin, 1965.

FARRAN, M. J. (1965). L'Altérabilité des roches, ses facteurs, sa prévision. *Annales de l'Institut technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, oct. 1965.

GSTALDER, S. (1965). Détermination des caractéristiques mécaniques des roches permettant l'appréciation de la forabilité. *Comptes Rendus du Colloque sur les techniques de forage et de production.* Institut Français du Pétrole, juin, 1965.

HABIB, P., J. BERNÈDE, et L. CARPENTIER (1965). Résultats des mesures de contraintes effectuées dans divers souterrains en France. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, juin, 1965.

HABIB, P., et P. DUFFAUT (1965). Essais de laboratoire et essais en place. Rapport au Comité Français des Grands Barrages, juin, 1965.

LONDE, P. (1965). *Une Étude d'analyse à trois dimensions de la stabilité d'une rive roche.* Bureau Coyne et Bellier, Paris.

MAYER, A. (1963). The Rankine Lecture: Recent work in rock mechanics. *Géotechnique*, Vol. 13, pp. 97–120.

——— P. HABIB, et R. MARCHAND (1951). Mesure en place des pressions de terrain. *Comptes Rendus du Congrès des Pressions de Terrain.* Liège, 1951.

MORE, G., et P. M. SIRIEYS (1965). Rupture des matériaux feuilletés. *Comptes Rendus Académie des Sciences de Paris*, mars, 1965.

MORLIER, P. J. (1964). Etude expérimentale de la déformation des roches. *Revue de l'Institut français du Pétrole*, oct. et nov. 1964.

MULLER, L. (1964). The rock slide in the Vajont Valley. *Felsmechanik und Ingenieur Geologie*, Vol. 2, 3/4.

PÉRAMI, R. (1965). Sur les Microfissures de roches soumises à des efforts uniaxiaux. *Comptes Rendus Académie des Sciences de Paris*, jan. 1965.

PINKERTON, I., et E. GIBSON (1964). Tumut 2 underground power plant. *Jour. Power Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 90, No. 3835, March, 1964.

SCHWARTZ, M. (1960). Prévisions de mouvements dans les voies. *Comptes Rendus du Congrès des Pressions de Terrain*, Paris, 1960.

TINCELIN, SINOU, et LEONET (1965). Soutènement suspendu par tiges d'acier scellées au ciment ou à la résine polyester dans les mines de fer de Lorraine. *L'Industrie Minérale*, oct. 1965.