Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 95 (1969)

Heft: 5

Artikel: La résistance au cisaillement le long de joints de roches avec stratigraphie hétérogène

Autor: Baldovin, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-70223

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

95e année Lausanne, 8 mars 1969 N° 5

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL
de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)
de la Section genevoise de la SIA
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPF (Ecole polytechnique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE
Président: E. Martin, arch. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; M. Mozer, arch.: J.-C. Ott, ing.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; M. Chevalier, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.; M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION
de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; M. Cosandey, ing.; J. Favre, arch.; A. Métraux, ing.; A. Rivoire, arch.; J.-P. Stucky, ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

RÉDACTION
F. Vermeille, rédacteur en chef; E. Schnitzler, ingénieur, et M. Bevilacqua, architecte, rédacteurs
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 46.—	Etranger	Fr. 50.—
Sociétaires	»	» 38.—	»	» 46.—
Prix du numéro . . .	»	» 2.30	»	» 2.50

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande » N° 10 - 5775, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29, 1000 Lausanne

ANNONCES
Tarif des annonces:

1/1 page	Fr. 495.—
1/2 »	» 260.—
1/4 »	» 132.—
1/8 »	» 68.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26, 1000 Lausanne et succursales

SOMMAIRE

La résistance au cisaillement le long de joints de roches avec stratigraphie hétérogène, par G. Baldovin, ingénieur-conseil.
Dénomination de l'unité de masse dans le système international d'unités.
Société vaudoise des ingénieurs et des architectes : Rapport d'activité 1968.
Les congrès. — SVIA : Assemblée générale ordinaire. — Carnet des concours. — Documentation générale. — Informations diverses.

LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT LE LONG DE JOINTS DE ROCHES AVEC STRATIGRAPHIE HÉTÉROGÈNE [1]

par G. BALDOVIN, ingénieur-conseil

1. Avant-propos

Les spécialistes sont appelés à affronter de plus en plus fréquemment le thème — certainement un des plus importants et des plus délicats — de la détermination de la résistance au cisaillement.

En effet, il n'y a pas d'études ou de calculs de stabilité qui ne dépendent pas, dans une mesure essentielle, de la connaissance de la cohésion et du frottement et de la loi de variation de ceux-ci pour les différentes conditions de travail du massif.

On sait bien qu'un chapitre particulier de la recherche de ces paramètres comprend l'étude, en laboratoire, d'échantillons de roches qui sont soumis à des essais triaxiaux ou de compression simple (axiale et brésilienne) : dans ces cas, malgré les difficultés particulières dues à la grande intensité des forces en jeu, l'expérimentation reprend la technique habituelle de la mécanique des sols et tend, de cette façon, à la construction de la courbe intrinsèque de résistance au cisaillement de la roche. Cependant, dans ces cas, on opère sur des échantillons de roches homogènes quant à la lithologie, monolithiques quant à la structure, ou intéressées seulement par des microfissures, des microfractures ou des joints de stratification très minces, c'est-à-dire par des discontinuités dites *de matrice*.

De bien plus vaste application pratique, dans la connaissance du discontinu qui caractérise justement la mécanique des roches, apparaît, d'autre part, l'étude des propriétés de celles-ci, telles qu'elles se manifestent le long des surfaces de discontinuités macroscopiques, des joints de stratification ou des surfaces de fracture ; il s'agit, en effet, de surfaces qui dans l'échelle des phénomènes concernant les constructions civiles, représentent les directions fondamentales privilégiées, le long desquelles on peut imaginer schématiquement le développement, à l'intérieur, des déformations plastiques des massifs rocheux.

L'étude de la résistance le long de telles surfaces conduit à l'exécution d'essais de cisaillement direct dont les techniques *in situ* ou, dans quelques cas, en labora-

[1] Exposé présenté à la réunion de la *Société suisse de mécanique des sols et de travaux de fondations*, des 3 et 4 mai 1968.

toire, sont l'objet d'expériences de plus en plus répandues, mais posent toute une gamme de problèmes de méthodologie et d'interprétation, auxquels un critère d'univocité manque encore.

Dans les essais *in situ* on emploie parfois des méthodes de première approximation, déduisant des courbes de compression sur plaque, construites pour la détermination du module d'élasticité, même les paramètres de cisaillement le long des discontinuités (1) [1]. Mais, dans l'ensemble, on remarque que la méthode d'essai la plus répandue est celle qui consiste à isoler de la masse rocheuse un bloc dont on maintient intacte la surface, le long de laquelle on veut obtenir la rupture, et à exercer sur ce bloc des poussées normales et tangentielles de grandeur croissante. Dans quelques cas, (fig. 1) ces poussées sont produites par un seul vérin, disposé avec des inclinaisons variables ; le plus souvent, au contraire, les deux contraintes sont produites par deux vérins indépendants qui permettent une meilleure exécution des essais et aussi la possibilité d'exercer des forces normales de consolidation avec des forces de cisaillement nulles.

Il est évident que l'application de charges normales et tangentielles avec un seul vérin rend particulièrement difficile l'interprétation du phénomène de rupture, surtout dans le cas où la courbe intrinsèque passe par l'origine des axes σ-τ.

La question fondamentale qui se pose pour cet essai est que les modalités expérimentales rendent les résultats applicables à l'étude des problèmes pratiques de stabilité. Les critères d'exécution de l'essai dépendent donc soit de la nature de la roche, soit de la dimension et du type de la charge à laquelle la roche sera soumise en réalité. En particulier, ces considérations jouent dans le choix des dimensions du bloc à essayer : en pratique, les techniciens donnent aux dimensions des valeurs très variables, si l'on pense que, à ce qui résulte de la littérature, on passe, dans différents cas, de blocs de 50×50 cm, en plan, jusqu'à des blocs de 5×5 m.

En pratique, les blocs doivent être apprêtés sans déranger la surface d'essai, de sorte que, pour des discontinuités très fréquentes, il est souvent indispensable de passer à de grandes dimensions ; d'autre part, la dimension minimale du bloc doit être au moins de l'ordre de l'épaisseur des couches. C'est pourquoi des blocs très étendus doivent encore correspondre à des couches très épaisses.

Quant aux conditions intermédiaires de discontinuité, la dimension du bloc dépend des irrégularités le long des surfaces de discontinuité, ainsi que du type de charge qui doit être appliquée à la roche : plus les irrégularités sont petites et plus la charge appliquée est concentrée, plus petites peuvent être les dimensions du bloc.

2. Les roches hétérogènes

Dans les surfaces de discontinuité, il est particulièrement important d'examiner les joints de stratification car, comme il est intuitif et comme il a été démontré par plusieurs auteurs, par exemple Dvořak et Peter (2), ces surfaces sont, en général, celles de moindre résistance et, par conséquent, de plus grand intérêt pour l'étude des problèmes pratiques.

Cela apparaît particulièrement vrai lorsqu'il s'agit de roches hétérogènes. Sous ce nom, nous comprenons les roches où s'alternent des couches différentes entre elles au point de vue de la structure, de la pétrographie et, en définitive, de la résistance mécanique.

En pratique, on peut distinguer, à ces effets, deux catégories :

Première catégorie. — Les roches dans lesquelles entre les couches à lithologie homogène, par ouverture des joints et dépôt successif ou bien par genèse géologique, sont présentes des inclusions de matériaux mécaniquement moins résistants. Dans ces cas, l'épaisseur des inclusions est modeste, de l'ordre des millimètres ou tout au plus de quelques centimètres, et elle n'est pas comparable à celle des éléments lapideux qui les comprennent. C'est, par exemple, le cas fréquent des couches de roches qui comprennent des intercalations d'argile.

Deuxième catégorie. — Roches dont la genèse, le plus souvent sédimentaire, a elle-même déterminé l'alternance de couches superposées à l'épaisseur très semblable, mais aux caractéristiques diverses. C'est le cas, par exemple, du grès marneux, des schistes calcaires avec des rapports variables carbonate/argile, etc.

Dans le premier cas, quelques expériences, qui résultent de la littérature, indiqueraient qu'au moins par des inclusions à consistance plastique, la résistance au cisaillement est très proche de celle de l'inclusion argileuse déterminée au triaxial.

Dans ce sens, des résultats ont été signalés, par exemple, par Underwood (3), qui opérait justement sur de la craie avec des inclusions de bentonite. Nous reviendrons plus loin sur ce point.

L'épaisseur de l'inclusion plastique est très importante ; pour des épaisseurs modestes, de l'ordre du millimètre ou de quelques millimètres, le contact ponctuel des couches lapideuses devient probable avec l'augmentation de la contrainte normale et on a par conséquent une augmentation, en apparence anormale, de la résistance au cisaillement et donc une courbe en T-N avec concavité vers le haut.

Nous mêmes avons contrôlé des exemples de ce genre sur des dolomies à inclusions argileuses (fig. 2).

Dans le second cas, le résultat est moins immédiat et seule une longue expérimentation peut fournir, de cas en cas, les indications nécessaires au calcul.

Le cas des roches hétérogènes, dans le sens précisé ci-dessus, a été étudié pour des cas particuliers par plusieurs auteurs qui se sont tous orientés vers les essais sur bloc en place.

En ce qui concerne ce type de roche, on signale seulement une modeste dispersion de résultats, si l'on passe d'essais sur grand bloc (jusqu'à 4×4 m) à des essais sur petit bloc (un quart de mètre carré) et moins ; l'effet échelle serait par conséquent peu marqué.

La constatation est rapportée, par exemple, par Uriel (4) relativement à des joints entre calcaire et lignite et entre grès et marne et par Krsmanović-Popović (5) pour des joints de calcaire avec intercalation d'argile.

[1] Les chiffres entre parenthèses renvoient à la bibliographie en fin d'article.

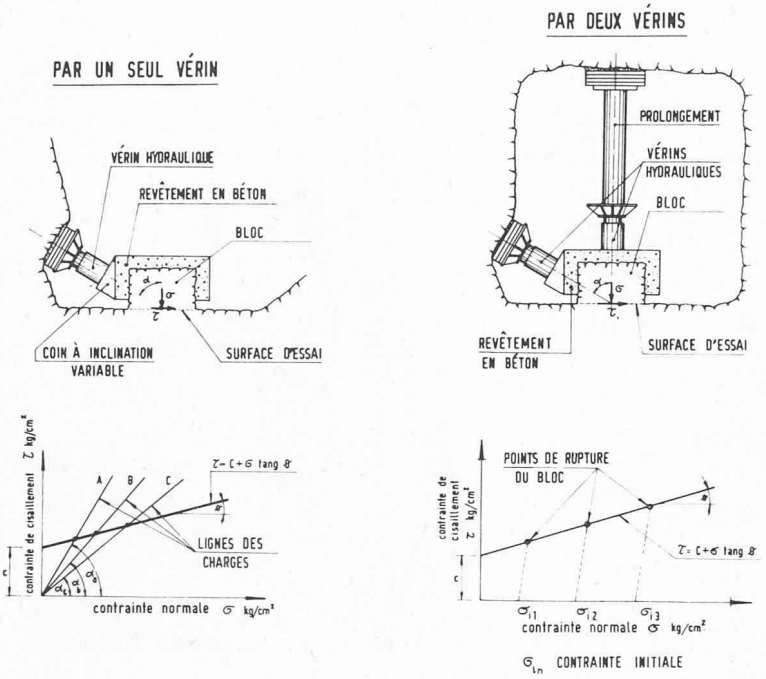

Fig. 1. — Essai de cisaillement *in situ*. — Schéma

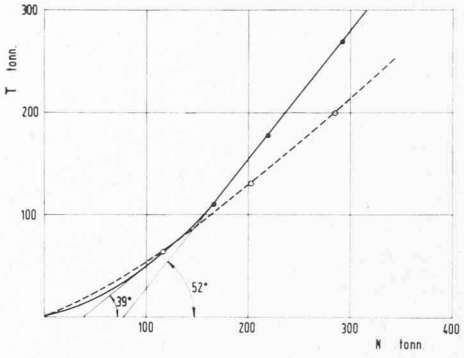

Fig. 2. — Essais *in situ* sur dolomies avec inclusions d'argile : courbes de cisaillement.

A la première approximation, la dite atténuation de l'effet échelle, pour des joints de ce type, semble explicable si l'on considère que, dans ces cas, la résistance au cisaillement dépend essentiellement des caractéristiques physico-mécaniques intrinsèques du matériel de moindre résistance, qui ne dépendent pas, sinon dans une petite mesure, de la dimension de la surface de cisaillement.

3. Différentes applications sur des roches hétérogènes

Récemment, à l'occasion de l'étude de quelques problèmes de mécanique des roches en Italie, nous avons pu approfondir quelque peu cet argument. Nous nous sommes demandé en particulier si, pour les roches hétérogènes, existe une corrélation entre les résultats d'essais *in situ* du type traditionnel, sur les dimensions moyennes du bloc 0,5 à 1 m², et les essais de laboratoire sur des échantillons de dimensions plus réduites, de 20×20 cm à 40×40 cm, exécutés en laboratoire avec un appareil spécial de cisaillement direct.

Nous sommes aussi en train de tenter d'évaluer les résultats obtenus du cisaillement direct, par rapport à ceux qu'on obtient au triaxial sur des échantillons extraits des couches de moindre résistance.

Quant à l'essai *in situ* sur bloc, la technique adoptée est celle du bloc isolé, revêtu de béton jusqu'à la surface du joint. Les contraintes sont transmises par deux vérins, l'un normal à la surface et l'autre incliné, mais tous les deux toujours disposés de façon que la résultante passe par le centre de gravité de la surface de rupture, évitant, de cette manière, l'apparition de concentrations possibles de tensions le long des bords du bloc, dues à des phénomènes de flexion.

En ce qui concerne la réalisation de l'état de rupture, on peut suivre deux critères différents, c'est-à-dire qu'on peut opérer à charge contrôlée ou bien à déformation contrôlée.

Il est indispensable d'opérer à charge contrôlée lorsqu'on dispose d'un seul bloc d'essai : c'est pourquoi il est nécessaire, pour obtenir une interprétation correcte, de limiter l'entité des déplacements le long du plan de rupture.

Avec ce critère, il est très difficile, même si cela est possible en théorie, de déterminer la résistance d'une roche avec un point de rupture très net, soit à cause de difficultés d'exécution qui demandent à l'opérateur une habileté particulière et de la sensibilité, soit, comme nous l'avons déjà dit, à cause de la nécessité de limiter les déformations.

Un critère plus facile et peut-être plus correct est, au contraire, celui de rejoindre l'état de rupture, opérant par des déformations contrôlées surtout lorsqu'il est possible d'établir la vitesse des accroissements à assigner aux déformations au cours de l'essai.

Comme l'on sait, dans l'essai sur bloc, l'élément fondamental est le choix du point de rupture (τ) qui corresponde à toute charge normale (σ).

On peut suivre habituellement divers critères (fig. 3).

Premier critère : Applicable seulement lorsque la courbe de rupture est du type A. On considère la rupture comme advenue au point τ_{max}, et la forme du diagramme marque un pic plus marqué, plus l'on est en présence de roches dures.

Deuxième critère : On considère que la rupture est advenue au point où la courbe τ-σ présente un genou (courbe type B). C'est un comportement typique des roches de résistance moyenne.

Troisième critère : On considère que la rupture est advenue lorsque la déformation est supérieure à une valeur préétablie (selon quelques-uns 1 millimètre, mais, dans le cas de roches hétérogènes tendres ou plastiques, il faut souvent monter à des déformations plus grandes).

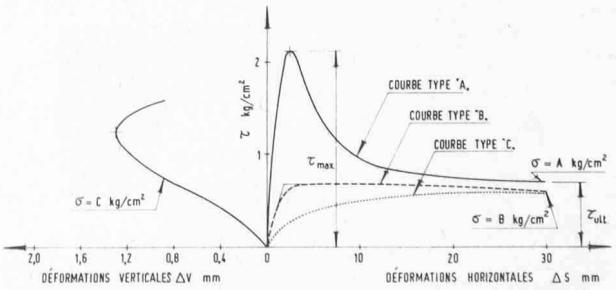

Fig. 3. — Courbes de rupture au cisaillement des roches.

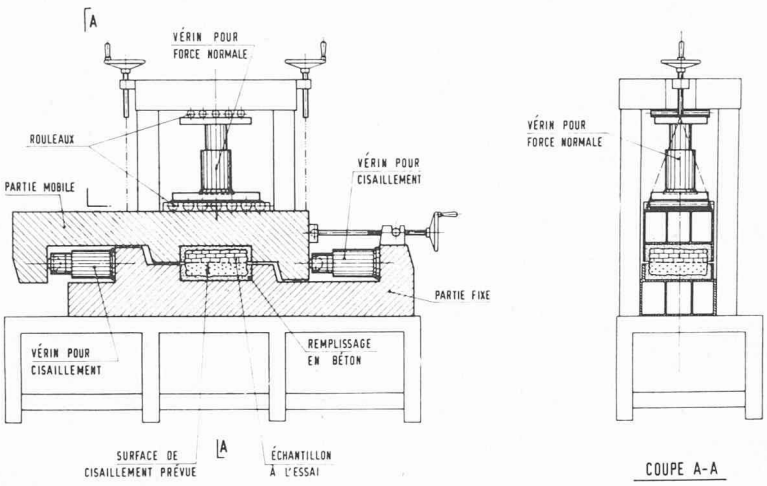

Fig. 4. — Schéma de l'appareil à cisaillement direct en laboratoire.

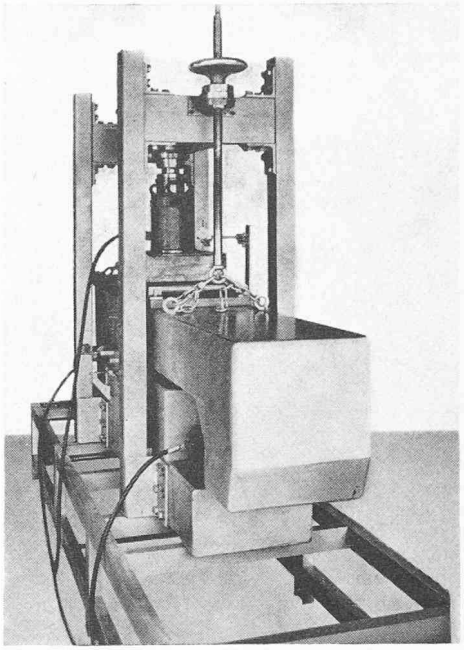

Fig. 5.

Quatrième critère : On tient en évidence les déformations verticales du bloc pendant l'essai. Ces déformations indiquent parfois une inversion des mouvements verticaux, inversion qui se vérifie en général peu avant la brusque descente des valeurs de τ et qui sont parfois typiques d'un phénomène de dilatation mis en évidence, entre autres, par Mencl (6). On assume alors la τ d'inversion comme indice d'une *rupture*, en correspondance de laquelle la stabilité du bloc est déjà compromise.

4. Essais de laboratoire

Quant aux essais de laboratoire, nous les exécutons sur des blocs de dimensions variables, avec un maximum de 40×40 cm.

Les opérations de prélèvement doivent être développées en fonction de la nature et des conditions de la roche.

Après avoir libéré supérieurement la surface sur des dimensions qui ne dépassent pas de beaucoup celles prévues pour l'échantillon définitif, le bloc est isolé le long des deux surfaces latérales.

A ce point, pour éviter le plus possible le détachement entre les surfaces, les trois cotés libres de l'échantillon sont cimentés.

On procède ensuite au cisaillement du côté postérieur et à la successive extraction du bloc. Avant le total enlèvement du bloc, on effectue une coulée de ciment à prise rapide ou de plâtre, le long de la paroi postérieure et des parois latérales.

En laboratoire, les blocs sont portés aux dimensions prévues pour l'exécution de l'essai par des disques abrasifs à haute vitesse, et par des appareillages à petits câbles hélicoïdaux.

L'appareil pour cisaillement direct (fig. 4) est analogue, quant au principe, à celui construit et utilisé récemment par Krsmanović (7) ; il est constitué par une base rigide et par une partie supérieure mobile. Sur celui-ci agissent deux vérins pour le mouvement horizontal, avec une poussée totale maximale de 120 tonnes, et un vérin vertical qui transmet une charge maximale de 60 tonnes et qui trouve réaction contre une barre jointe rigidement à la structure de base.

Les dimensions en plan de la boîte sont presque de 40×40 cm ; la hauteur peut, au contraire, varier en fonction de l'échantillon à cisailler (fig. 5 et 6).

Des réductions spéciales permettent l'emploi d'échantillons de dimensions inférieures à celles de la boîte et, ensuite, le développement de plus grandes pressions, particulièrement significatives pour les essais sur roche intègre. Il est possible, de cette façon, d'atteindre des pressions de cisaillement de l'ordre de 1000 kg/cm² (pour des échantillons de 10×10 cm) avec une σ_{max} de 500 kg/cm². Les déformations, soit horizontales, soit verticales, sont mesurées par des comparateurs centésimaux ; les lectures aux manomètres sont faites à des intervalles réguliers de déplacement, c'est-à-dire suivant la méthode de la déformation contrôlée, avec vitesse de déformation variable et, pour des roches hétérogènes, de l'ordre d'un millimètre par minute.

Chaque fois que l'on peut opérer sur des blocs réduits en laboratoire, on a de nombreux avantages pratiques ; il est, avant tout, possible d'expérimenter un nombre élevé d'échantillons, parvenant ainsi à des résultats statistiquement plus significatifs, qu'on ne peut les obtenir par des essais *in situ*, laborieux et coûteux ; tout

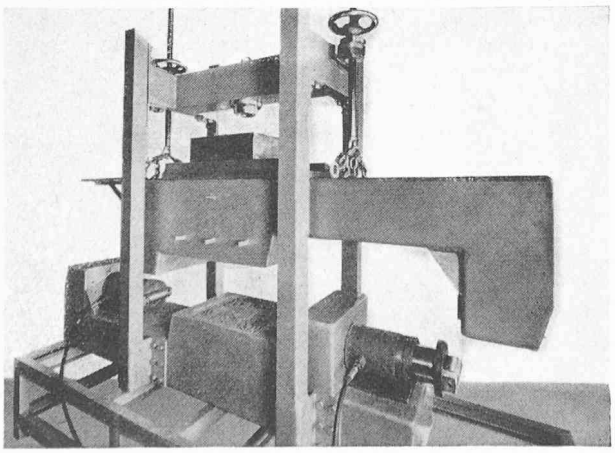

Fig. 6.

de suite après l'essai, on contrôle la surface de rupture et on écarte les résultats qui indiquent une allure irrégulière de la surface susdite.

Par exemple, le cas de rupture profonde, qui se présente fréquemment, n'est pas pris en considération, car il indique la présence d'un effet de moment, dû à l'action des vérins.

En second lieu, on peut conduire l'essai en laboratoire avec une plus grande rigueur scientifique, car chaque point de la courbe σ-τ peut être déduit par des essais sur bloc intact, là où pour les essais *in situ* on est souvent obligé d'utiliser le même bloc pour tracer entièrement la courbe en σ-τ, avec une imperfection évidente dans l'évaluation du paramètre *cohésion*, altéré par la première rupture.

A ce propos, nous pouvons rappeler des observations intéressantes sur l'altération produite sur l'échantillon par des essais répétés et, en particulier, sur la réduction apparente de résistance au cisaillement ; ces observations nous ont été indiquées, entre autres, par Lombardi - Dal Vesco (8) dans leurs récentes expériences.

Dans les essais en laboratoire, il est possible, en outre, de continuer l'essai pour chaque valeur de σ, jusqu'à obtenir des déformations de plusieurs centimètres. Cela permet la détermination de la résistance au cisaillement, résiduelle, qui est particulièrement importante pour le calcul de stabilité en conditions limites de déformation et surtout pour des roches hétérogènes dans lesquelles il faut justement prévoir de grandes valeurs de déformation.

5. Exemples d'essais

Parmi les problèmes de roches hétérogènes que nous avons analysés récemment, certains ont fourni des résultats que nous avons jugés d'intérêt pratique.

L'étude d'un éboulement existant à proximité de Gênes (fig. 7) nous a conduit à un examen comparé de la résistance au cisaillement dans du calcaire marneux avec des intercalations de schistes argileux. Il s'agit d'une formation que la littérature technique nomme *flysch* de M. Antola. Les niveaux argilo-schisteux, à bonnes caractéristiques mécaniques en profondeur, sont très altérés à proximité de la surface où ils ont souvent la consistance typique de l'argile plastique (fig. 8-9).

L'allure très régulière de la stratigraphie, la difficulté pratique de réaliser des essais *in situ* et la nécessité d'une recherche statistique très approfondie, ont suggéré ici de fixer toute l'attention principalement sur les essais de laboratoire.

On a opéré sur des échantillons de 30×30 cm de dimension en plan ; chacun d'eux comprenait deux couches de calcaire et une couche intermédiaire de schiste argileux, d'environ 15 millimètres d'épaisseur. On a examiné de nombreuses séries d'échantillons avec schistes à différents grades d'altération ; entre elles, on présente ici une série typique, avec schiste pratiquement intact (fig. 10).

Comme le font apparaître les courbes de cisaillement τ en fonction de la déformation horizontale, les courbes sont du type que, ci-dessus, nous avons appelé A, c'est-à-dire avec un maximum caractéristique qui indique bien le point de rupture, sauf pour les essais à petites charges verticales (σ).

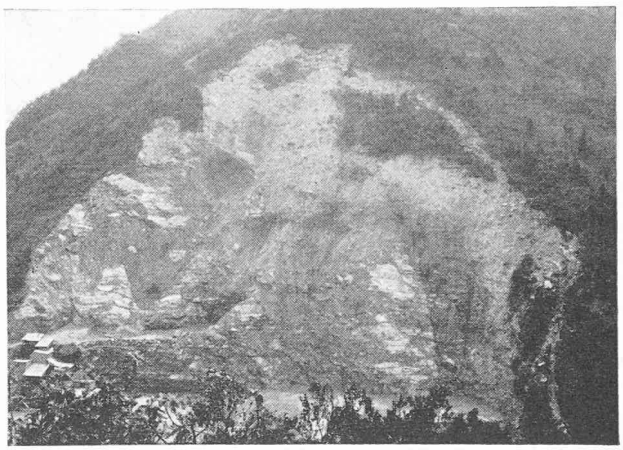

Fig. 7.

Fig. 8.

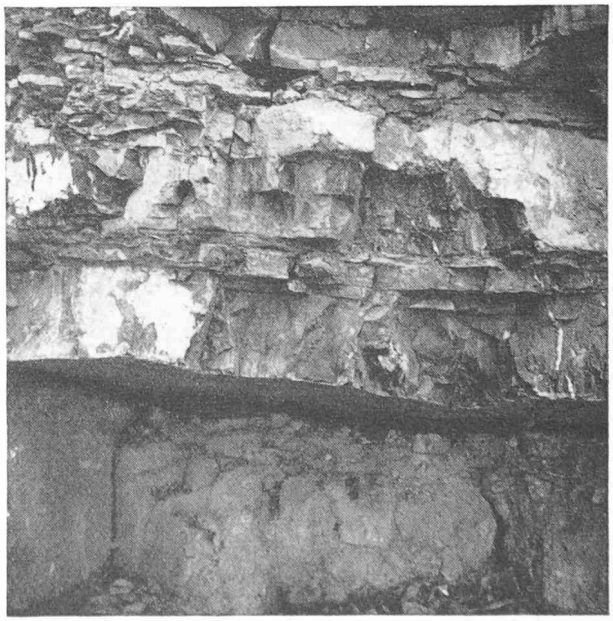

Fig. 9.

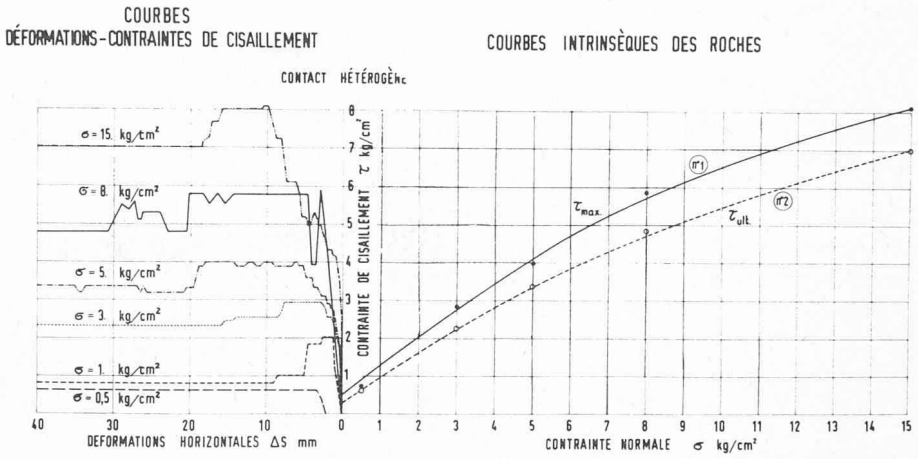

Fig. 10. — Eboulement *Giro del Fullo* à Gênes.

Si nous nous rapportons aux différents critères de rupture susdits, nous trouvons qu'avec le critère du τ_{max}, la courbe intrinsèque se trouve être la courbe n. 1 ; si l'on adopte au contraire le critère de la déformation ultime, que pour ces roches nous prenons égale à 40 mm, la courbe se modifie et devient la courbe n. 2.

Il faut noter que, par ces essais, les courbes intrinsèques ont une courbure petite, ce qui est bien la caractéristique du phénomène de cisaillement le long des surfaces de schistosité. Il est intéressant encore de remarquer la valeur très basse de la cohésion et, par conséquent, le fait que la courbe de résistance maximale n'est pas très différente de la résistance résiduelle.

Quant aux caractéristiques de la surface de rupture, elle est plane, comme toujours dans cette roche, et correspond au contact entre calcaire et argilo-schiste. Il arrive parfois que la rupture se développe à l'intérieur de la couche argilo-schisteuse, mais toujours le long d'une surface de schistosité préexistante.

Etant donné la nature de l'inclusion argileuse, il n'a pas été possible de prélever, de ce matériau, des échantillons intacts pour les essais triaxiaux. On a alors exécuté quelques essais de cisaillement direct sur sol argilo-schisteux, opérant avec le même appareil sur des échantillons de dimensions 20×20 cm.

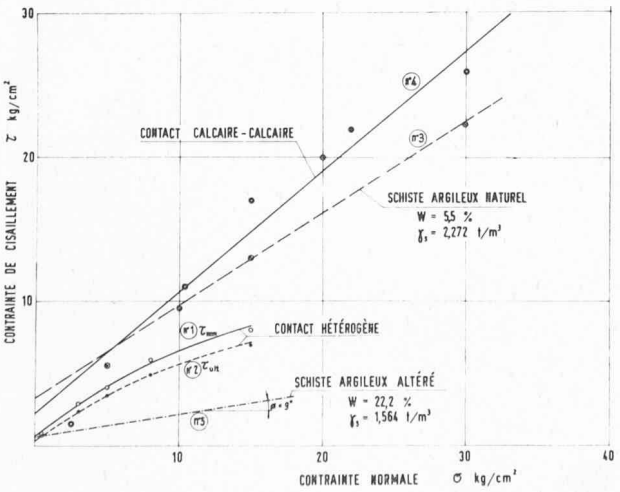

Fig. 11. — Eboulement *Giro del Fullo* à Gênes : Courbes intrinsèques des roches.

Les résultats indiquent la même nature du phénomène de rupture enregistré sur l'ensemble des couches hétérogènes, mais la courbe en σ-τ (fig. 11) déduite pour le sol argileux-schisteux, est pratiquement une ligne droite qui indique un angle de frottement plus élevé que celui du contact.

La figure montre nettement, par superposition, l'échelle de résistance à partir du contact de calcaire sur calcaire (n. 4), là où l'argilo-schiste est pratiquement inexistant, jusqu'à celle de l'argilo-schiste (n. 3), et finalement elle présente celle propre à la roche hétérogène (n. 1 et 2).

Sur la même figure, on indique aussi la courbe (n. 5) σ-τ obtenue au triaxial, sur l'argilo-schiste très altéré et à grande teneur en eau.

Ainsi qu'on le voit, l'angle de frottement est devenu ici négligeable, ce qui, si l'on considère les résultats ci-dessus, vaut cependant même pour l'ensemble de la formation rocheuse hétérogène et a donc contribué à expliquer les phases de développement de l'éboulement à l'étude.

Les essais de laboratoire ont permis l'exécution de calculs de stabilité du talus pour différentes conditions d'inhibition et ils ont indiqué, dans une certaine mesure, la direction à suivre pour limiter la progression des glissements.

Un problème complètement différent a été étudié dans l'Apennin, en Italie centrale, où on va surélever un réservoir existant.

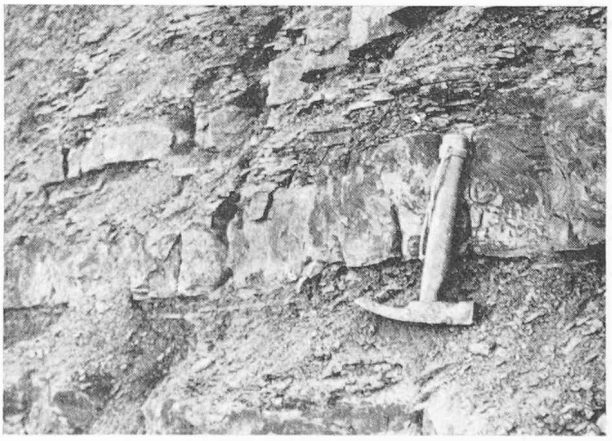

Fig. 12.

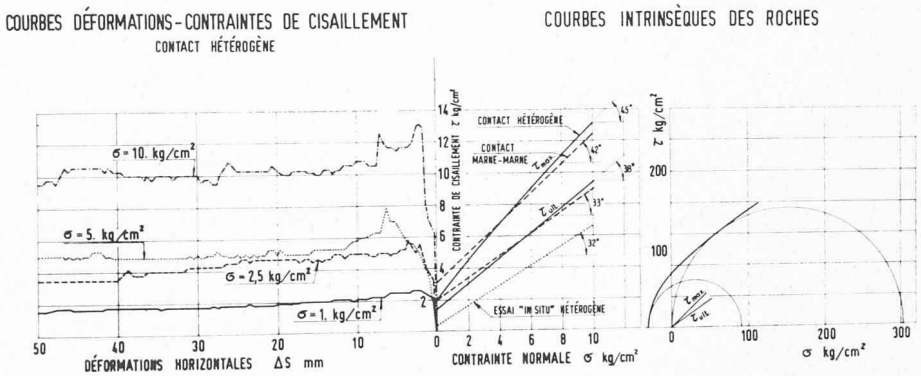

Fig. 13. — Grès et marnes du réservoir de *Campotosto*.

Il s'agit, dans ce cas, d'une roche constituée par du grès à ciment de calcite ou de calcite et argile et de marnes plutôt sablonneuses. Ces deux types lithologiques se succèdent en forme de couches d'épaisseur variable, de quelques centimètres à plusieurs décimètres (fig. 12).

Les couches sont horizontales ou ont des inclinaisons très petites et très variables. Pour cette roche, la littérature (Capozza-Ravaglioli) (9) dispose de résultats d'essais de cisaillement *in situ* sur des blocs d'un mètre carré de dimension : la courbe intrinsèque est à allure rectiligne et correspond à une cohésion de 0,3 à 0,5 kg/cm² et à un frottement $\varphi = 31$ à 32°.

Sur cette roche, nous avons opéré une série d'essais en laboratoire, sur des blocs de 30×30 cm de dimension, comprenant une couche de grès et une de marne, chacune de 15 cm d'épaisseur.

Les courbes de rupture cisaillement-déformation (fig. 13) présentent un maximum assez bien défini.

Les courbes en σ-τ dénoncent une différence sensible entre les conditions de résistance maximale et celles de résistance ultime. La première des deux courbes a une allure légèrement curviligne mais, déjà à 10 kg/cm² de compression, le frottement est de l'ordre de la valeur résiduelle.

Ainsi qu'on peut le remarquer, cette dernière valeur est proche de 38° et, par conséquent, elle est plus élevée que celle mesurée par les essais *in situ*. Au cours de ceux-ci, on a pratiquement remarqué au contraire la disparition de la cohésion qui, dans les blocs essayés en laboratoire, dénonce encore une certaine solidité entre les couches hétérogènes.

Dans cette roche, le matériel relativement plus tendre (marne) est encore nettement au stade lapideux ; lui-même soumis à l'essai de l'appareil à cisaillement — contact entre marne et marne — il fournit des angles de frottement proches de ceux de la rupture hétérogène. Une bonne correspondance est observée aussi parmi les résultats d'essais de rupture monoaxiale, rapportés sur la figure comme des cercles de Mohr, et ceux obtenus à l'appareil de cisaillement.

Un troisième exemple (fig. 14) d'essais sur roches hétérogènes est celui que nous avons développé pour l'étude de la formation d'un môle, le môle VII à Trieste. Le môle est fondé sur pieux de grand diamètre qui sont préfabriqués creux, par centrifugation, et posés sur le fond de la mer (fig. 15) ; les pieux sont enfoncés par excavation à l'intérieur et ensuite on procède au remplissage en béton. Le diamètre des pieux est de 1,80 m à l'extérieur. La longueur est entre 25 et 35 m. Le fond est formé par un banc de limon au-dessus duquel les pieux rencontrent la roche altérée, dite *crostello*, de quelques mètres d'épaisseur, et enfin la roche intacte. Celle-ci consiste dans un grès marneux avec des couches d'une épaisseur de quelques dizaines de centimètres; les couches de marne vont de quelques millimètres à quelques centimètres.

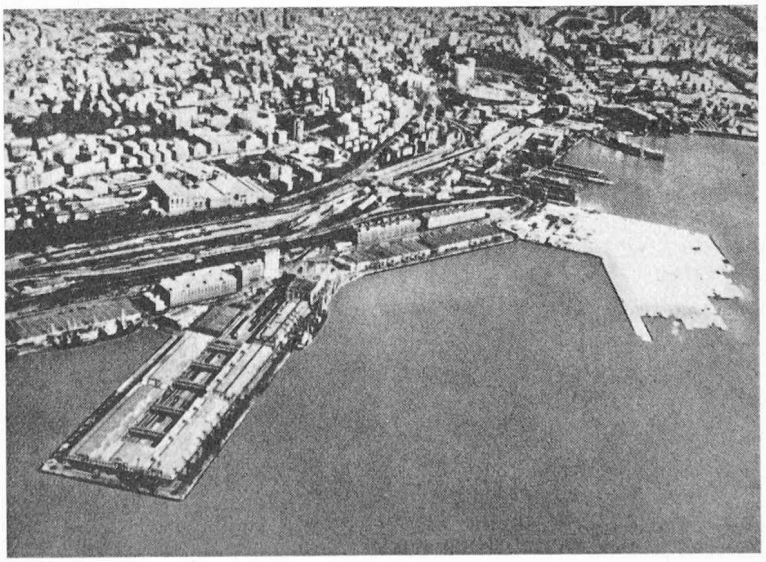

Fig. 14.

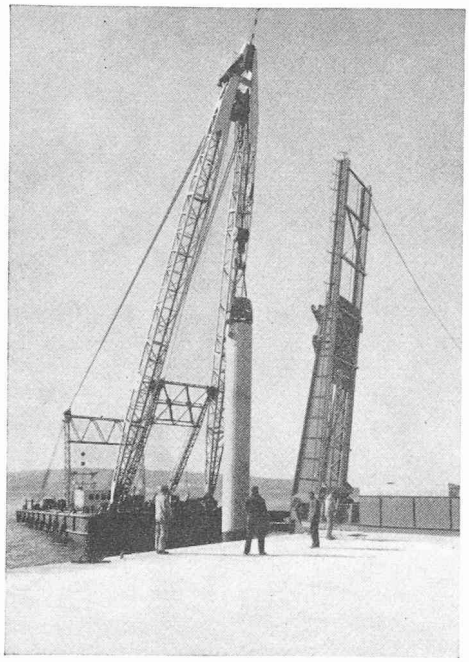

Fig. 15.

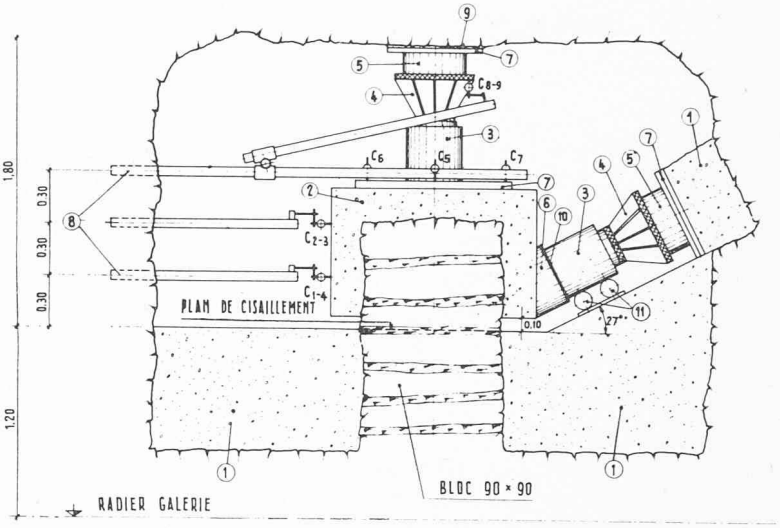

Fig. 17. — Construction du môle VII à Trieste, essai de cisaillement *in situ* : schéma d'applications des charges et des mesures.

1 Remplissage en béton
2 Revêtement en béton armé
3 Vérin hydraulique, 200 t
4 Cône métallique
5 Bloc de bois cerclé
6 Coin métallique
7 Plaque métallique
8 Tiges aux comparateurs
9 Mortier
10 Caoutchouc
11 Rouleaux sous vérin
C_n Comparateurs

Marne argileuse — Grès

L'allure des couches varie avec une grande fréquence et est souvent intéressée par des plis qui ont parfois une grande courbure (fig. 16).

Pour l'étude de cette roche, on a exécuté des essais en laboratoire et d'autres de cisaillement sur bloc *in situ*, opérant à l'intérieur d'une galerie aux alentours du chantier.

L'essai *in situ*, sur bloc de 90×90 cm (fig. 17), a été réalisé suivant la méthode de la charge contrôlée. La nécessité d'utiliser le même bloc pour l'essai avec des charges verticales différentes a obligé, en effet, à limiter l'entité des déformations.

La courbe intrinsèque qu'on en a déduite (fig. 18) est tracée suivant deux critères : A) pour la variation de pente de la courbe charges-déformations ; B) pour la déformation maximale de 1 mm.

Les essais en laboratoire ont été exécutés sur des échantillons de 25×25 cm, opérant, comme d'habitude, par déformation contrôlée.

Les courbes de rupture (fig. 19) ont la forme indiquée dans la figure : elles sont du type A pour les charges les plus grandes, du type C pour σ de quelques kg/cm².

Les courbes σ-τ, obtenues par les essais *in situ*, en laboratoire sur des blocs et à l'appareil triaxial seulement pour la marne sont, dans la figure, superposées pour rendre possible la comparaison.

On voit que la courbe σ-τ de cisaillement hétérogène *in situ* est très proche, abstraction faite de la cohésion, de celle obtenue en laboratoire pour la condition *ultime*,

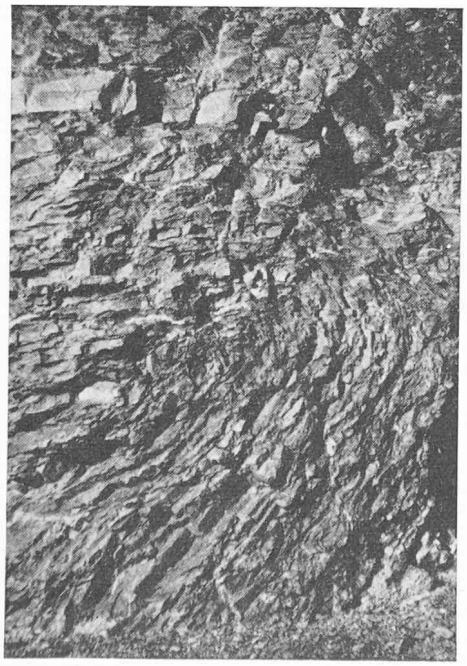

Fig. 16.

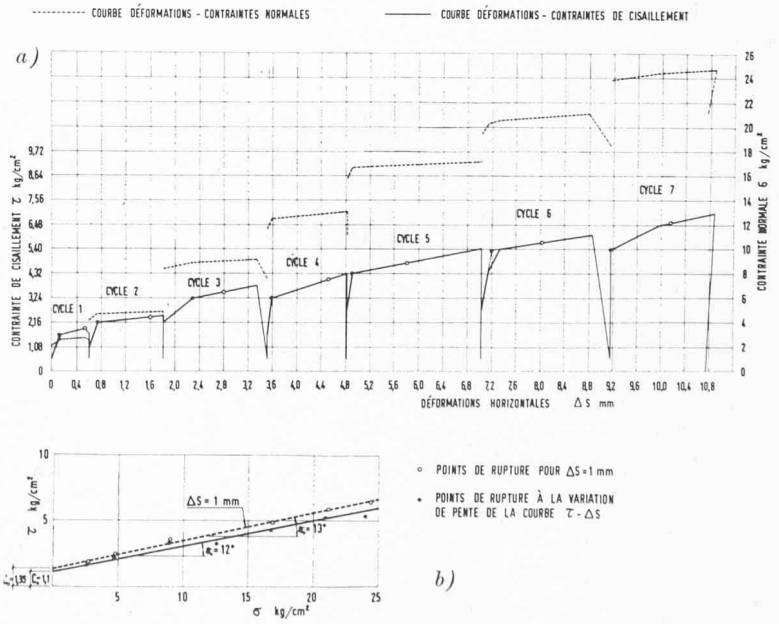

Fig. 18. — Construction du môle VII à Trieste :
a) Essai de cisaillement *in situ*. *b*) Courbe intrinsèque de la roche.

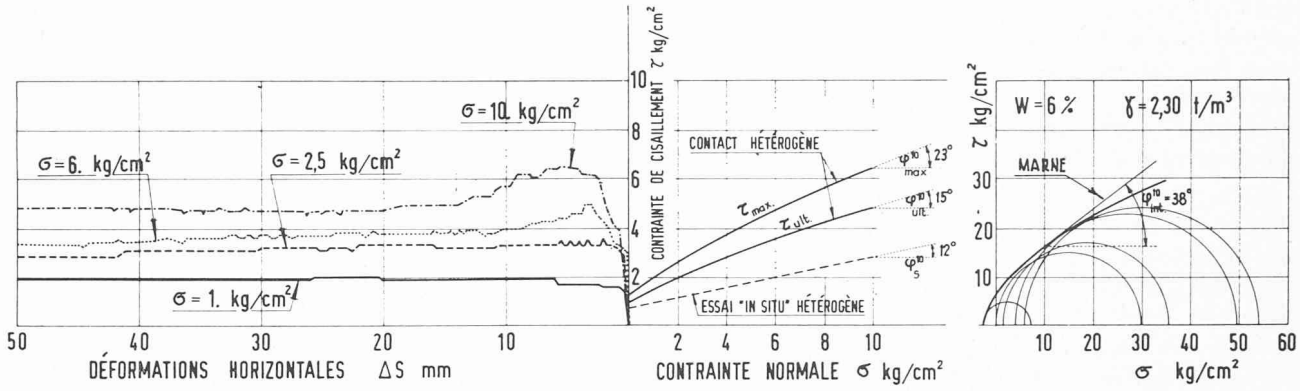

Fig. 19. — Construction du môle VII à Trieste :

a) Courbes déformations-contraintes de cisaillement (contact hétérogène).

b) Courbes intrinsèques.

tandis que la résistance maximale au cisaillement est, au laboratoire, sensiblement plus élevée.

La courbe intrinsèque de la marne seule indique l'existence d'une remarquable cohésion, pratiquement inexistante au contact marne-grès ; même l'angle de frottement interne, σ égales, est un peu plus élevé que l'angle global sur couches hétérogènes.

D'après ces résultats, pour atteindre des coefficients suffisants de sécurité à la base des pieux, il a été nécessaire (fig. 20) d'enfoncer, par excavation selon la méthode *rotary*, le noyau des pieux dans la roche jusqu'à 8 mètres de profondeur. Les pieux sont calculés pour supporter une charge maximale de 1300 tonnes chacun.

6. Conclusions

L'ensemble des nombreux essais effectués sur roches hétérogènes, dont les exemples cités représentent des cas typiques, nous permet de déduire quelques observations qui nous semblent d'utilité pratique.

La difficulté d'établir des règles de validité générale pour la détermination de la résistance des roches au cisaillement peut être considérée comme réduite, dans une certaine mesure, si l'on se trouve en présence de ces roches particulières ; pour celles-ci, en effet, il n'y a pas de doute que la résistance minimale se manifeste le long des joints hétérogènes ; l'alternance de couches plus dures et de couches plus tendres fait en sorte que, le

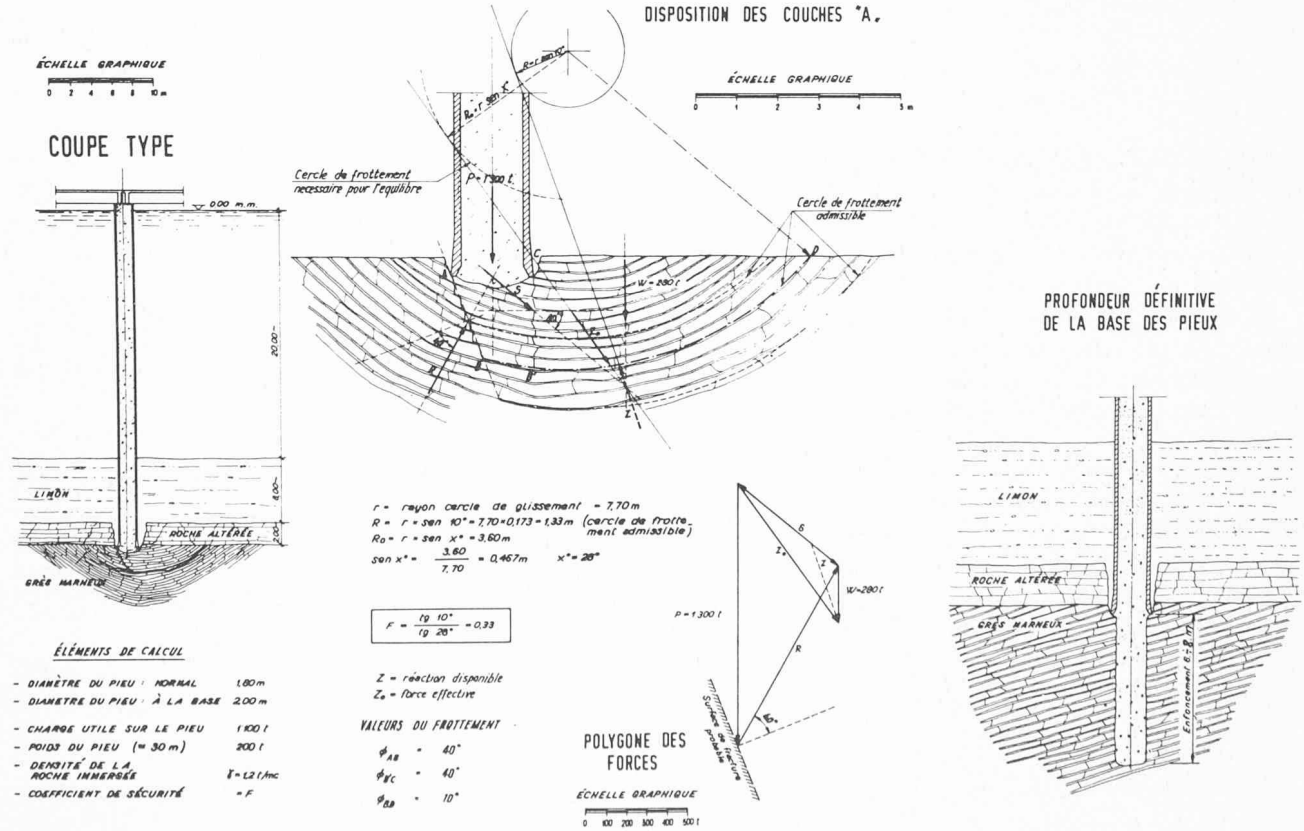

Fig. 20. — Construction du môle VII à Trieste : calcul de la fondation des pieux (charge totale 1300 t).

long des fractures ou des joints qui ne coïncident pas avec lesdites surfaces, la cohésion et le frottement dépendent surtout des caractéristiques du matériel le plus résistant, tandis que, le long des surfaces de contact entre divers matériaux, la résistance du matériel le plus faible a une importance déterminante.

Au sujet des moyens de détermination de la résistance au cisaillement dans ces roches, où les irrégularités superficielles, le long des joints, sont généralement trés petites, l'essai le plus significatif est, selon notre expérience, celui du cisaillement direct. Dans ce cas, les résultats des essais *in situ* sont toujours très utiles ; mais l'exemple de cas différents permet d'opérer avec une précision suffisante sur l'appareil de cisaillement de laboratoire, pourvu que le prélèvement et la préparation soient faits avec beaucoup de soin. En particulier, en employant l'appareil, il est possible d'étudier très facilement l'influence du paramètre qui, pour ces roches, est peut-être le plus important, c'est-à-dire l'influence de l'eau de saturation.

Comme nous l'avons dit, il est essentiel d'établir le critère de choix du point de rupture de l'échantillon pour l'interprétation des essais. Selon notre expérience, dans les roches hétérogènes, on peut obtenir presque toujours une valeur du τ_{max}, mais on réalise rarement la courbe avec un pic très marqué, et cela si la couche tendre a une bonne consistance. On a observé d'ailleurs que l'inversion caractéristique des mouvements verticaux, qui précède la rupture, est directement contrôlable dans les essais *in situ*, ainsi que dans les essais de laboratoire, mais dans plusieurs cas, avec l'appareil, le phénomène n'est pas très net et, par conséquent, il ne peut être pris comme le seul indice de rupture.

Il est plutôt indispensable de contrôler toujours la courbe de cisaillement *ultime* qui, au contraire, est généralement bien définie et très proche de celle déduite de l'essai *in situ*.

Il faudra contrôler avec beaucoup de soin la forme de la surface de cisaillement, pour s'assurer qu'il n'y a pas eu, à la rupture, des composantes de flexion sur la surface même. Généralement, on a constaté que la rupture survient au contact de la couche dure et de la couche tendre et parfois à l'intérieur de la couche tendre, mais seulement en présence de phénomènes de schistosités.

On a remarqué, en outre, que la résistance au cisaillement, sur la surface de rupture au contact, est inférieure à la résistance typique du matériel le plus tendre ; cette constatation, à laquelle aujourd'hui on ne peut attribuer un caractère général, est cependant très importante, car elle invite à ne pas appliquer au bloc, comme il semblerait intuitif, des résultats partiels de laboratoire, déduits seulement des inclusions plastiques.

En ce qui concerne la forme de la courbe intrinsèque σ-τ, que plusieurs auteurs trouvent éloignée de la ligne droite pour les joints de la roche, dans les essais sur roches hétérogènes, nous avons, au contraire, obtenu normalement des allures très proches d'une droite, au moins pour les valeurs de σ de quelques dizaines de kilos. Cela correspondrait bien à ce que Patton (10) a expérimenté, c'est-à-dire au fait que la courbure diminuerait avec la diminution des irrégularités de la surface.

Pour conclure, il faut relever que dans ces roches la valeur de la cohésion, dans la courbe intrinsèque, est habituellement modeste ; cela rend souvent très petite la variation des paramètres c et φ entre la condition de résistance maximale et celle de résistance résiduelle : ce qui peut rendre compatibles, avec la stabilité apparente de l'ensemble rocheux, de grandes déformations plastiques, sans qu'il y ait un passage net à l'état de rupture.

C'est une des nombreuses raisons qui recommandent de procéder avec la plus grande prudence dans les problèmes où la corrélation, entre les forces appliquées et les déformations, est déterminante.

Dans les problèmes de mécanique des roches, discipline encore si récente, la théorie et la technique expérimentales rencontrent, à chaque pas, de nouvelles difficultés ; pour les franchir, malheureusement, nous n'avons pas l'aide de lois générales acquises, qui encouragent le chercheur dans son choix.

Pour la formation de cette science, l'apport généreux des expériences les plus disparates est, par conséquent, absolument nécessaire, afin que du travail de tous les spécialistes dérivent finalement des principes fondamentaux et des schémas précis d'expérimentation et de calcul, comme l'on fait déjà depuis longtemps pour la mécanique des sols.

Dans ce sens, il me semble particulièrement pertinent de rappeler aujourd'hui, journée dédiée à la mécanique des roches, les recommandations que le professeur Schnitter fit, il y a quelques années, au Congrès de Zurich de votre société : il invita chaleureusement les techniciens à mettre à disposition de leurs collègues les expériences de leur travail, mesures, essais et résultats, parce que seulement par ce moyen on peut atteindre, dans l'intérêt de tous, un enrichissement des connaissances géotechniques générales.

BIBLIOGRAPHIE

(1) J. Talobre : *La mécanique des roches*. Dunod, 1957.

(2) A. Dvorak and P. Peter : *Field test of a shale foundation*. Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1961.

(3) L. B. Underwood : *Chalk foundations at Four Major Dams in the Missouri River Basin*. 8th International Congress on large Dams, 1964.

(4) S. Uriel : La geotécnica aplicada a las grandes presas. *Revista de Obras Publicas*, 1964.

(5) D. Krsmanovic and M. Popovic : *Large scale field tests of the shear strengt of limestone*. 1st Congress of Int. Soc. of Rock Mechanics, 1966.

(6) V. Mencl : Dilatancy of Rocks. *Felsmekanik*, Vol. III/2.

(7) D. Krsmanovic : Initial and residual shear strengt of hard rocks. *Geotechnique*, Vol. XVII, number 2, June 1967.

(8) G. Lombardi und E. Dal Vesco : *Die experimentelle Bestimmung der Reibungskoeffizienten für die Felswiederlager der Staumauer Contra (Verzasca)*. Sitzungsberichte des Ersten Kongresses Int. Gesellschaft für Felsmechanik, 1966.

(9) F. Capozza e U. Ravaglioli : Prova di taglio « in situ » sulla roccia di fondazione della diga di Sella Pedicate. *L'Acqua*, 1967, n. 3.

(10) F. D. Patton : *Multiple modes of shear failure in rock*. 1st Congress Int. Soc. of rock Mechanics, 1966.

Adresse de l'auteur :
G. Baldovin, ingénieur-conseil, directeur du Bureau Geotecna, Via Solari 41, Milan.