

**LE  
XV° COLLOQUE  
DE MÉCANIQUE DES ROCHES  
DE SALZBOURG**

**Compte rendu**

PAR

**HABIB \*, COMES & P. DUFFAUT \*\*  
LEGROS, P. LONDE & SCHNEIDER \*\*\*  
ET LÉVÊQUE \*\*\*\***

La confrontation annuelle de Salzbourg entre ingénieurs de génie civil et des mines, et d'autre part savants, chercheurs ou professeurs, s'est déroulée les 24 et 25 septembre 1964, à l'initiative du groupe autrichien de la Société Internationale de Mécanique des Roches (en cours de formation). L'Allemagne et l'Autriche ont fourni les trois quarts des assistants et 16 autres pays avaient envoyé des délégations. Par contre, les 14 communications étaient partagées par moitié entre les « austro-allemands » et les « autres pays » (bien que la délégation française soit, par le nombre, dans le premier peloton avec les délégations suisse, yougoslave et italienne, il n'y avait aucune communication française, et ceci est évidemment lié au caractère bilingue du colloque ouvert seulement à l'anglais et à l'allemand).

Le thème proposé au colloque, *la sécurité dans les travaux au rocher*, restait assez général pour accepter des calculs théoriques, des modèles de déformation et de rupture, des dispositifs d'aus-

cultation du massif rocheux, voire des méthodes d'exécution des tunnels. Mais, en réalité, plus de la moitié des communications s'applique à un chapitre spécial : l'équilibre des versants naturels et des talus artificiels en matériaux rocheux. Nous avons donc traité d'abord cet important sujet.

Les modèles discontinus et les tunnels constituent deux chapitres moins abondants.

Les communications et les discussions parfois très importantes qui ont suivi seront publiées intégralement dans la revue *Felsmechanik und Ingenieur Geologie* (avec des résumés et des légendes en français). Le compte rendu ci-dessous est donc très simplifié et les illustrations ne sont que des schémas donnés à titre indicatif. Les noms des personnes citées peuvent aussi comporter des erreurs. Nous espérons que les intéressés voudront bien les excuser.

---

### L'équilibre des versants rocheux

---

#### A - Etudes théoriques

M. FOLBERTH (Milan) a présenté un modèle mathématique tridimensionnel pour le calcul sur ordinateur des déformations et des contraintes dans le domaine élastique. Il assimile le milieu continu à

\* Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique.

\*\* Service Géologique et Géotechnique à Electricité de France.

\*\*\* Coyne et Bellier.

\*\*\*\* Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

un réseau de poutrelles trirectangulaires tout à fait analogue à l'ossature d'un immeuble et montre qu'on peut introduire des modules ( $E$ ,  $G$  et  $\mu$ ) variables pour représenter l'anisotropie et l'hétérogénéité du matériau. Il signale l'intérêt très général de cette méthode (poutres épaisses, barrages-poids, etc.) et donne un exemple d'application numérique pour le talus d'une fouille représenté figure 1.

M. WITKE (Karlsruhe) a étendu à de nouveaux cas de figure, l'étude commencée l'année précédente (voir *La Houille Blanche*, janvier 1964) (Equilibre d'un bloc complètement séparé par deux failles du reste d'un versant). Il donne six exemples concrets d'applications récentes, faisant parfois intervenir des surcharges, notamment une tour-relais de télévision.

Après cet exposé, M. LONDE (France) a rappelé le principe d'une méthode d'analyse comportant pour un bloc limité par trois plans, le poids propre, l'action d'un ouvrage, la sous-pression et les coefficients de frottement (ce principe et l'abaque correspondants déjà exposés à Edimbourg sont publiés avec les comptes rendus du 8<sup>e</sup> Congrès des Grands Barrages).

M. HAEFELI (Suisse) compare fructueusement les mouvements des fronts de glaciers aux ruptures des versants rocheux : dans les glaciers arctiques, le front vertical devient peu à peu surplombant et la rupture se produit par rotation autour de la base, tandis que, dans les glaciers alpins, le glissement sur le bed-rock domine.

M. ROCHA (Lisbonne) souligne l'importance de la définition du coefficient de sécurité appliqué à la rupture par cisaillement. Il s'intéresse aussi à la dispersion des propriétés du massif et rappelle l'intérêt de l'indice d'altération. Ses théories sont largement exposées dans son rapport au 8<sup>e</sup> Congrès des Grands Barrages.

## B - Description de cas particuliers

M. WEISS (Radenthein) décrit un phénomène de glissement lent affectant un versant montagneux au-dessus d'une mine à ciel ouvert (volume estimé à 30 millions de m<sup>3</sup>).

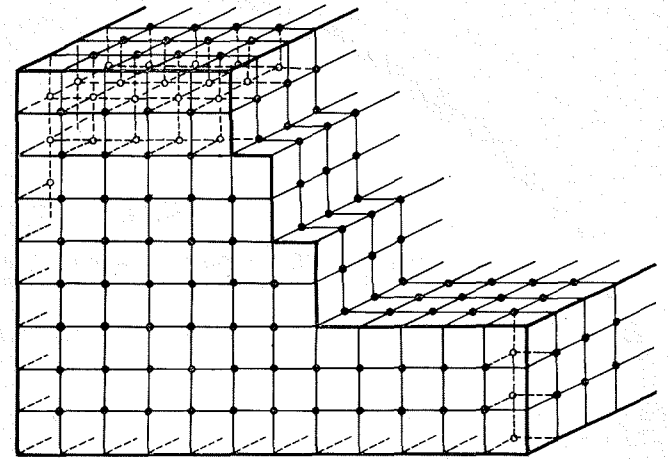
Les vitesses du déplacement de repères superficiels ont été analysées pendant plusieurs années. En moyenne, elles sont plus grandes en hiver (6,5 mm par jour) qu'en été (2,5 mm par jour). En outre, pendant l'été, on constate l'influence de la schistosité, alors que les mouvements hivernaux sont plus régulièrement orientés suivant la pente du versant. Les périodes pluvieuses augmentent la vitesse, avec un décalage dans le temps de l'ordre de 15 jours.

De nombreuses photographies illustrent les ruptures superficielles localisées, et les déformations constatées dans les galeries de mine.

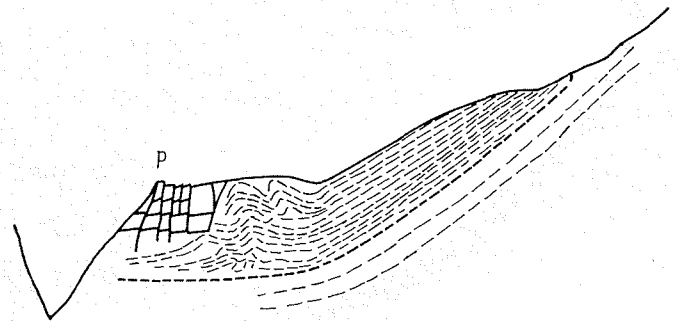
L'évolution de ce phénomène a cessé lorsque l'exploitation à ciel ouvert a été arrêtée.

En commentaire, M. HAEFELI donne deux exemples de glissement lent affectant cette fois non des massifs rocheux, mais des zones argileuses :

Dans un cas, c'est l'eau d'un nouveau réservoir qui a provoqué un tassement vertical de 5 m accompagné d'une composante horizontale de 3 m. Les mouvements se sont stabilisés au bout de trois mois. Notons que la pluie était sans influence sur ces mouvements.

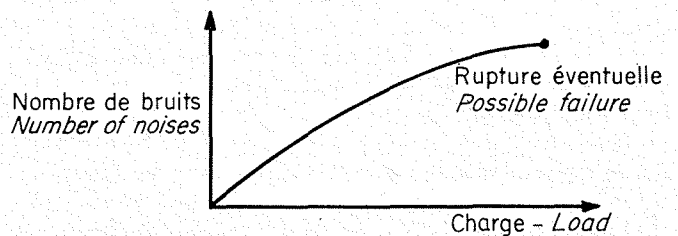


1/ Modèle tridimensionnel.  
Three-dimensional model.

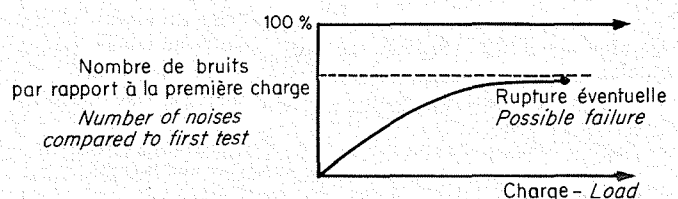


2/ Coupe de la rive gauche du Vajont au niveau du pinacle p. Cassures horizontales et verticales, plissement des couches rouges du crétacé; limite inférieure du glissement.

*Vajont left bank cross-section at "pinacle" p. Horizontal and vertical faulting. Folds in the Red Cretaceous layers; lower limit of slip.*



3/ Auscultation d'un échantillon sous une presse.  
Noise given out by a sample under pressure load.



4/ Deuxième essai après repos.  
Second test on above sample after a period at rest.

Dans un autre cas, une très vaste zone de terre et blocs présente les formes d'un grand glacier. Les vitesses étudiées tant en surface qu'en profondeur sont plus élevées en été qu'en hiver (jusqu'à 50 cm par jour, alors que la vitesse moyenne est seulement 11 m par an).

\*\*

M. MÜLLER (Salzbourg) a présenté l'histoire du glissement de terrain catastrophique survenu le 9 octobre 1963 dans la retenue du barrage de Vajont en Italie. Il a illustré son exposé par la projection simultanée de très nombreux couples de photographies prises avant et après le glissement (1).

Il a eu l'occasion de parcourir lui-même le terrain après le premier petit éboulement de 1960 et il a pu montrer des coupes géologiques très détaillées, insistant sur la complexité des structures : les couches rouges du crétacé étaient à la fois plissotées, découpées horizontalement par la décompression parallèle au fond d'une ancienne vallée glaciaire, et partagées en pans verticaux (« pinacles ») au voisinage de la gorge proprement dite (fig. 2).

Il a longuement commenté les résultats de l'auscultation du versant pendant les trois dernières années. Dans les sondages profonds, le niveau piézométrique suivait rapidement les variations de niveau de la retenue. Les déplacements des repères topographiques étaient de l'ordre de 4 mm par jour en temps normal. Pendant les périodes de remplissage, ils ont atteint 35 mm par jour, tant en 1960 qu'en 1962 et 1963. Cette variation de vitesse ne paraît pas liée à la pluviosité, puisqu'on ne l'a pas observée en 1961, année où le niveau est resté très bas à cause de travaux dans la retenue (galerie bypass en prévision de l'éboulement).

La veille de la catastrophe, alors que le niveau baissait depuis plusieurs jours, la vitesse du déplacement semble avoir atteint 800 mm par jour.

L'augmentation très brutale de cette vitesse, jusqu'à une valeur de l'ordre de 60 km/h, impliquerait une disparition complète des résistances internes. Ce phénomène est assimilé par M. Müller à une sorte de thixotropie, donnant à l'ensemble du volume en mouvement (250 millions de m<sup>3</sup>) le comportement d'un liquide.

Grâce à cette vitesse extraordinaire, la masse rocheuse a avancé de 300 m, franchissant la partie profonde de la gorge sans la remplir, et remontant d'au moins 100 m contre les falaises de la rive opposée.

En raison des suites judiciaires données en Italie à cette catastrophe, aucune discussion n'est ouverte. Mais, M. Müller insiste sur le caractère absolument inconnu de ce phénomène qui était donc imprévisible.

### C - L'auscultation et l'équilibre des versants

MM. MAYR, SOLYMAR et WEBER (Salzbourg) ont présenté une abondante collection photographique de glissements de terrain. Ils discutent les possibilités offertes par les méthodes géophysiques, et rappellent le rôle joué par l'eau, à la fois par sa pression et par l'altération du squelette solide.

L'étude des déformations de la surface d'un versant naturel, ou d'un talus artificiel, peut se faire par des procédés topographiques (nivellement, alignement, triangulation). Pour l'auscultation en profondeur, on peut utiliser des fils scellés dans des sondages. Ou bien ces fils dépassent la tête du trou d'une quantité mesurable (ils sont alors tendus par un poids constant) ou bien ils sont fixés à la manière des tirants et on mesure alors la variation de leur tension (1).

En multipliant le nombre de fils scellés à diverses profondeurs, on peut localiser la position des surfaces de glissement.

Les courbes de déformation, en fonction du temps, montrent des tronçons analogues aux trois phases classiques du fluage des métaux : forte croissance initiale, phase asymptotique, reprise de la croissance. Cette dernière phase annonce la ruine définitive.

MM. GOODMAN et BLAKE (Berkeley, U.S.A.), ont étudié les bruits produits, dans le massif rocheux, par sa déformation (ou plutôt ses ruptures localisées successives). C'est donc proprement l'auscultation médicale avec enregistrement sur bande magnétique.

Dans une étude sur échantillon, le nombre de bruits augmente avec la charge (fig. 3) jusqu'à la rupture. Lorsqu'on décharge l'échantillon avant la rupture, et qu'on le laisse reposer un certain temps, on constate une certaine cicatrisation, puisqu'une deuxième opération donne une nombre de bruits inférieurs à celui du premier cycle. Cette cicatrisation augmente avec la durée du repos (fig. 4).

Sur le terrain un grand nombre de glissements actifs ont été étudiés. On a observé des bruits plus fréquents avant les éboulements et au contraire la diminution de cette fréquence annonce la stabilisation.

Il a fallu mettre en parallèle plusieurs appareils pour éliminer des bruits parasites causés par exemple par la chute sur le capteur de grains de silt entraînés par le vent.

Dans un cas spectaculaire de mouvements du sol au-dessus d'un tunnel de chemin de fer effondré, la corrélation s'est montrée tout à fait significative entre la recrudescence des bruits et l'apparition de désordres importants à la surface. Dans d'autres cas, des mesures extensométriques à la surface du massif ont mis en évidence la variation brusque des contraintes après chaque période de bruit.

Au sujet de cette communication, M. DVORAK a cité un glissement important pour lequel les bruits ne se groupaient pas en périodes d'activité particulière, mais paraissaient assez régulièrement répartis dans le temps.

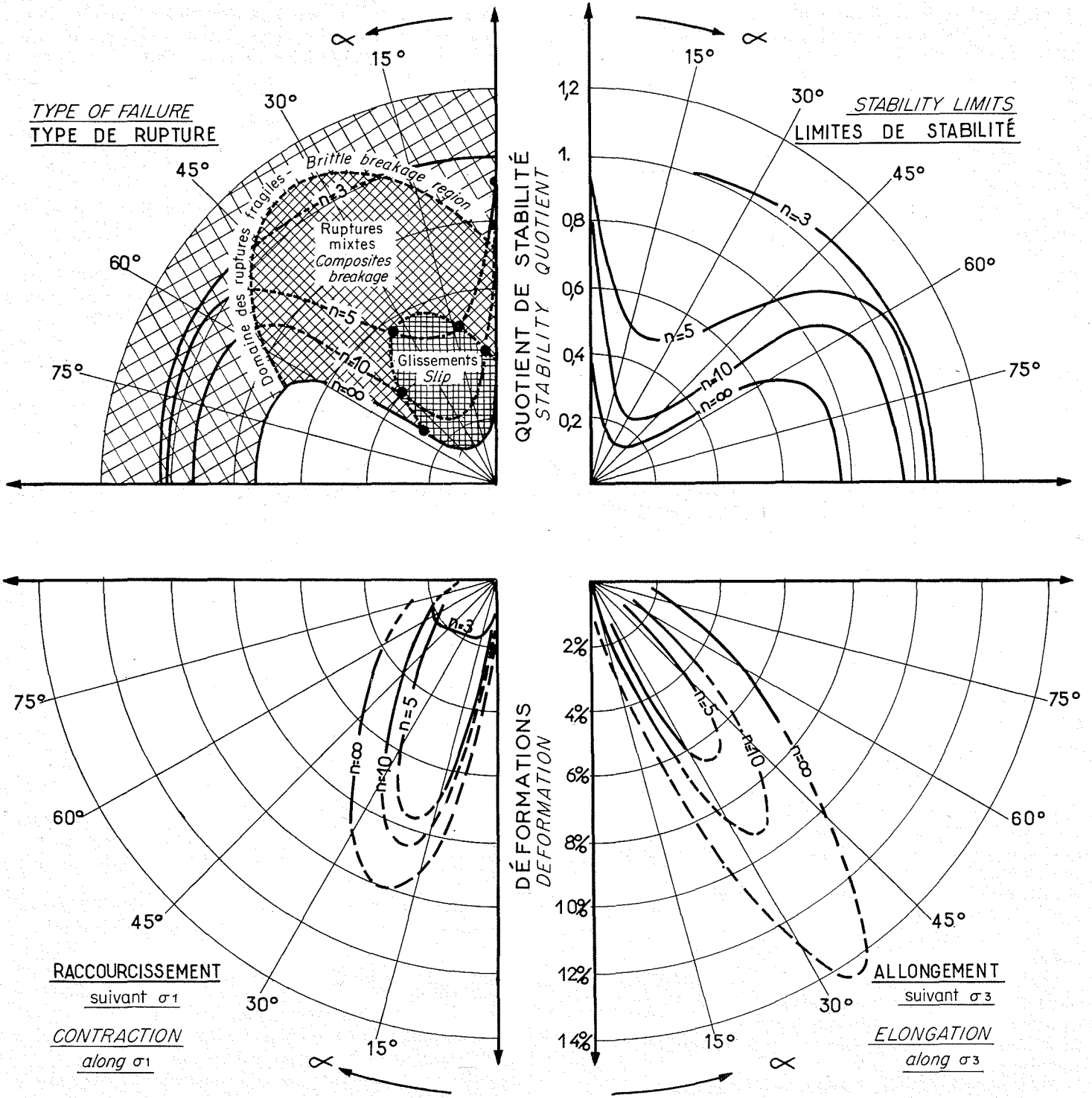
### D - La géomorphologie des versants naturels

MM. GERBER et SCHEIDEGGER (Suisse), présentent des observations géomorphologiques sur les versants du Jura suisse : il y a deux types de versants différenciés par leur pente.

Au-dessous de 35° sur l'horizontale, l'altération

(1) Cet exposé vient de paraître dans le volume II/3-4 de *Felsmechanik und Ingenieurgeologie* (note ajoutée en cours d'impression).

(1) Ce procédé est une application directe des fils utilisés par le Professeur Potts de Newcastle pour mesurer la déformation des piliers de mine et qui sont notamment en service dans les mines de potasse d'Alsace.



Résultats d'essais pour différentes valeurs du rapport  $n = \sigma_3 / \sigma_1$ .

/5/

Test results for various values of  $n = \sigma_3 / \sigma_1$ .

superficielle est le phénomène majeur qui transforme la roche en débris transportables par les agents d'érosion.

Au-dessus, au contraire, c'est la rupture fragile qui domine et qui par détachement d'écaillés successives tend à augmenter jusqu'à la verticale la pente superficielle. La fissuration commence par le pied, dans la zone la plus chargée, et se poursuit vers le haut.

Les écaillés de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur s'étendent sur une grande surface. Leur

chute provoque des « niches » et plusieurs exemples montrent que les parois de ces niches s'expliquent par des ruptures conformes à la théorie de Mohr.

Dans la discussion, MM. HAEFELI et HORNINGER (Vienne), étudient les contraintes de cisaillement produites à la surface par les gradients hygrométriques et thermiques. M. MÜLLER confirme le caractère progressif de la rupture : ce sont des processus qu'il faut étudier et non pas des phénomènes statiques.

### E - Effets de l'explosif sur la stabilité des versants

M. DVORAK (Prague), donne des exemples concrets de l'effet de sautages sur la stabilité de talus rocheux quelquefois assez éloignés. Il insiste sur l'effet des discontinuités naturelles qui peuvent limiter le domaine du danger.

Il montre qu'un tir peut provoquer des déformations importantes du massif discontinu et accélérer considérablement la vitesse d'un glissement déjà actif.

### F - Consolidation

M. STEINBICHLER (Salzbourg) commente des photographies des 300 tirants mis en place pour la consolidation des versants verticaux de la gorge du Vajont immédiatement à l'aval du barrage. Les poutres de béton qui reliaient ces tirants ont été en grande partie détruites lors du déversement catastrophique, mais les tirants sont restés en bon état.

### Les modèles discontinus

MM. MÜLLER et PACHER (Salzbourg) présentent les résultats d'essais de rupture sur des modèles discontinus en conditions biaxiales. Le modèle est une plaque carrée en béton, de  $70 \times 70$  cm, comportant une seule famille de joints parallèles régulièrement espacés. La surface libre permet l'observation et l'extensométrie.

Sept paramètres ont été étudiés :

- angle  $\alpha$  des joints sur la contrainte principale la plus grande;
- rapport  $n$  entre les deux contraintes principales;
- degré de séparation des joints (1, 2/3 et 1/3);
- ouverture des joints;
- influence de joints plus nombreux (minimum 10);
- résistance du matériau de remplissage (cohésion et frottement);
- résistance du matériau du modèle.

Les résultats sont exprimés par le *quotient de stabilité*, rapport de la résistance à la rupture du matériau discontinu à celle du bloc continu dans les mêmes conditions. La figure 5 donne, en fonction de l'angle  $\alpha$  dans ses différents quadrants :

- en haut, le quotient de stabilité, avec à gauche, le type de rupture, suivant qu'elle se compose seulement de glissement ou qu'elle comporte des ruptures fragiles;
- en bas, les déformations relatives; allongements à droite suivant la direction de la contrainte la plus faible, raccourcissements à gauche.

La courbe  $n$  infini, qui correspond à la charge monoaxiale, donne les plus grandes déformations et le quotient le plus faible. On retiendra l'angle limite de  $60^\circ$  au-dessus duquel l'effet des joints est inexistant. C'est autour de  $30^\circ$  que l'abaissement de résistance est maximal; il atteint 85 %.

Ce graphique est à rapprocher des résultats d'essais sur schistes, publiés par Von Donath à Santa-Monica en 1963, et des calculs théoriques publiés auparavant par Pacher; on constate une convergence remarquable entre les graphiques résumant ces trois moyens d'approche.

Dans les différents essais apparaît une relation nette entre la déformation à la rupture et le quotient de stabilité. Le rapport des déformations principales est compris entre 0,1 et 0,4 au début de l'essai et se rapproche ensuite de 1 (0,6 à 1,6). Le coefficient de Poisson, ou plutôt le coefficient d'expansion latérale, reste inférieur à 0,3 pour des charges faibles, puis il augmente et peut atteindre 1,5 au moment de la rupture.

M. KRSMANOVIC (Sarajevo), expose la poursuite des essais présentés l'année précédente : il étudie le problème plan d'un arc de barrage-voûte s'appuyant sur un massif discontinu à deux familles de joints. Le principal paramètre est l'inclinaison des joints. Il compare aussi le cas théorique où les joints d'une famille sont contrariés, avec le cas général où les deux familles sont continues.

Comme dans les essais de Müller et Pacher, on distingue la rupture de l'appui par glissements généralisés, et les cas où se manifeste la rupture des blocs, soit sous forme de fissures localisées, soit par écrasement.

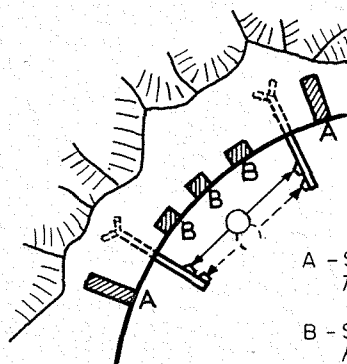
Parfois, ces modes de rupture se juxtaposent. Lorsque l'orientation des joints le permet, c'est le premier mode de rupture, par glissements, qui est le plus défavorable.

Dans une autre série d'essais, le barrage comporte un « coussin » (*pulvino*) sur lequel un dispositif d'auscultation permet de tracer la répartition des contraintes. On peut ainsi suivre la variation des réactions de l'appui au fur et à mesure de la progression des ruptures.

### Les problèmes de tunnels

MM. OBERTI et GOFFI (Turin-Bergame), ont fait de nombreuses mesures de contraintes sur le revêtement en béton de tunnels routiers (Mont-Blanc, Grand Saint-Bernard et tunnel de Cèsa dans l'Apennin). La figure 6 montre le dispositif employé sur des bases de 40 à 70 cm. Les résultats font apparaître l'importance considérable des efforts de flexion, attribués à des concentrations locales de contraintes dans le massif rocheux. Lorsque le terrain est schisteux, l'anisotropie des pressions normales est la plus grande.

Si le dispositif n'est pas mis en place dès le décoffrage du béton (à un moment où les efforts sont supposés nuls), il faut procéder à la libération des contraintes, soit totale par des saignées profondes,



A - Saignées de libération totale  
Total stress-relief grooves

B - Saignées de libération partielle  
Partial stress-relief grooves

soit partielle par des saignées moins importantes (dont l'interprétation demande alors un calibrage sur modèle).

Parallèlement à ces mesures sur des ouvrages terminés, le laboratoire de Bergame étudie sur modèle l'influence de la perforation et du revêtement sur le comportement d'un massif plastique indéfini.

Après cette communication, MM. DE REEPER (Hollande), et PACHER exposent à leur tour les résultats de mesures analogues.

M. RABCEWICZ (Vienne), développe la mesure des déformations diamétrales des tunnels et leur application du calcul des revêtements. Il décrit ensuite la technique du soutènement en béton projeté, qui par simple augmentation d'épaisseur, se transforme en revêtement définitif.

M. BENDA (Prague), détaille une technique de revêtement par éléments préfabriqués en béton mise au point dans les mines slovaques. Les voussoirs représentant un quart de cercle; leur transport et

leur mise en place sont entièrement mécanisés, et ils sont ensuite bloqués par injection de mortier. Le petit nombre d'éléments normalisés permet leur fabrication en série.

La rapidité de la mise en place permet de limiter considérablement la charge maximale supportée par le revêtement (comme d'ailleurs dans la technique du béton projeté exposée par M. Rabcewicz).

---

### **Divers**

---

M. LANGER (Hanovre), tente de raccorder les modules d'élasticité dynamiques et statiques par une analyse des différents comportements rhéologiques possibles.

Faciles à multiplier pour un prix dérisoire, les prospections et mesures dynamiques apportent donc une contribution de grande valeur aux reconnaissances de travaux souterrains.