

# La fissuration des gneiss de Malpasset

C'est en décembre 1959 que la catastrophe de Malpasset s'est produite. Très rapidement la qualité du béton a été mise hors de cause, ainsi que celle de la structure de la voûte du barrage elle-même. La recherche des causes s'est alors orientée vers les appuis rocheux, et en particulier vers celui de la rive gauche, c'est-à-dire vers les qualités mécaniques de ces matériaux.

Le livre de J. Talobre *La Mécanique des Roches* était paru deux ans avant cette date, en 1957. Il s'agissait de la première étude synthétique sur ce sujet. Lors de la reconnaissance d'un site de barrage les essais mécaniques décrits dans ce livre étaient loin d'être systématiques. La reconnaissance était basée sur des estimations qualitatives des appuis, sur la nature géologique des roches, sur l'observation de l'aspect, sur la sonorité du choc du marteau du Géologue, éventuellement sur quelques essais de résistance à la compression simple avec des échantillons prélevés sur le site et, peut-être, pour l'élasticité, avec des mesures *in situ* avec un vérin et des forces de l'ordre de la dizaine de tonnes, comme pour les fondations du barrage de Tignes, en 1949 ainsi que pour d'autres, en Algérie, par Drouhin, avant la guerre.

Après la catastrophe, des descriptions précises de la structure géologique du site et de la cicatrice, de la nature des discontinuités majeures observables, des études du gneiss observé en lame mince ont été faites mais, bien évidemment, énormément de matériaux avaient été arrachés par des millions de mètres cubes d'eau capables d'entraîner roches et bétons comme fétus de paille.

En 1961, un programme de recherche sur le fluage des roches, demandé par des mineurs, avait commencé au Laboratoire de mécanique de l'École polytechnique sur du charbon, de l'anthracite, des minerais de fer, de la potasse et du calcaire pour cimenterie, donnant des résultats très différents selon les milieux. J'avais donc pris contact avec l'inspecteur général J. Duffaut, qui au ministère de l'Industrie était chef du Service technique de l'électricité et des grands barrages (STEEGB) et à ce titre avait suivi les travaux des commissions d'enquête sur la catastrophe de Malpasset, et je lui ai proposé d'étudier le fluage des gneiss de la fondation. Il m'avait paru assez sceptique, et effectivement l'expérience a montré qu'il n'y avait pratiquement pas de singularité particulière du fluage du gneiss de Malpasset.

Le bureau d'études Coyne et Bellier a alors demandé de faire une étude mécanique exhaustive en mettant en œuvre tous les essais qu'on pouvait faire sur la roche de Malpasset : densité, résistance à la compression simple et à la traction simple (sec et humide), essais triaxiaux et courbe intrinsèque, résistance au cisaillement, module de Young et coefficient de Poisson, anisotropie, perméabilité, vitesse de propagation du son... Presque tous ces essais étaient analysés en relation avec la fissuration de ces roches : la dispersion des résultats sur des matières paraissant homogènes, mais qui en fait ne l'étaient pas, provenait bien de la fissuration. L'effet d'échelle, c'est-à-dire le fait que les petits échantillons étaient plus résistants que les gros et que les résultats des petits étaient plus dispersés, pouvait s'interpréter par des défauts plus au moins grands dans les roches, la présence de gros défauts étant plus probable dans un grand volume que dans un petit<sup>1</sup>. Et les défauts des roches, ce sont les fissures. D'ailleurs, dans un essai triaxial sous forte pression les fissures sont écrasées, leurs faces frottent davantage entre elles et la dispersion diminue ou même disparaît.

En comparant les résultats obtenus avec les gneiss de Malpasset et ceux obtenus pour d'autres roches, il n'y avait rien qui parut anormal : il y avait comme toujours une grande dispersion des résultats. Par exemple, avec le gneiss de la rive gauche, la résistance à la compression simple sur un peu plus de 150 essais variait de 1 à 10. Mais la valeur moyenne était de 36,5 MPa, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que celle du béton du barrage. Comme pour d'autres matériaux rocheux, il y avait un effet d'échelle en compression simple sur des éprouvettes homothétiques cylindriques de diamètre 1 cm ; 3,5 cm ; 6 cm. Mais de là à extrapoler cette résistance pour évaluer celle d'une cicatrice de 10 000 m<sup>2</sup>... Il faut souligner aussi que la comparaison avec d'autres matériaux était difficile car à cette époque il n'y avait pas encore de normes, ni même de recommandations pour les

<sup>(1)</sup> La résistance d'une chaîne est celle de son maillon le plus faible ; donc, plus une chaîne est longue, moins elle est résistante.

## P. HABIB

Ancien Président  
du Comité français  
de mécanique des roches  
Conseiller scientifique  
du LMS  
(École polytechnique-  
École des mines ParisTech)  
LMS  
École polytechnique  
91128 Palaiseau Cedex

essais sur les roches, cela ne devait exister que bien plus tard et sous l'égide de la Société internationale de mécanique des roches, puis de l'AFNOR en France.

Bien que les gneiss aient paru suffisamment étanches pour qu'une coupure imperméable sous le barrage ne paraisse pas utile, mais comme des infiltrations avaient certainement dû se produire sous la fondation du barrage, il fallait étudier la perméabilité, sans doute très petite, de cette roche. Pour les très faibles perméabilités en mécanique des sols une telle mesure est faite dans un œdomètre à travers des échantillons de faible épaisseur. Mais avec des roches, le problème des fuites latérales aurait rendu nécessaire de coller l'éprouvette aux parois de l'appareil, ce qui aurait été long et coûteux, surtout si l'on voulait faire un peu de statistique. En définitive, l'essai fut fait sur un cylindre de roche de 6 cm de diamètre et de 15 cm de longueur, placé dans une chambre cylindrique, assis sur une pierre poreuse, protégé par une gaine cylindrique de silastène, écrasée par la pression  $p$  qui régnait dans la chambre (Fig. 1) et le contact avec la roche aurait dû ainsi être étanche. En mesurant la quantité d'eau écoulée on pouvait calculer la perméabilité. Cet essai n'a pas été satisfaisant : le débit d'infiltration n'était pas réversible lors de la baisse de pression qui suivait la montée en pression ; et aussi l'essai n'était pas fidèle, probablement à cause de mauvais contacts entre la gaine et la roche.

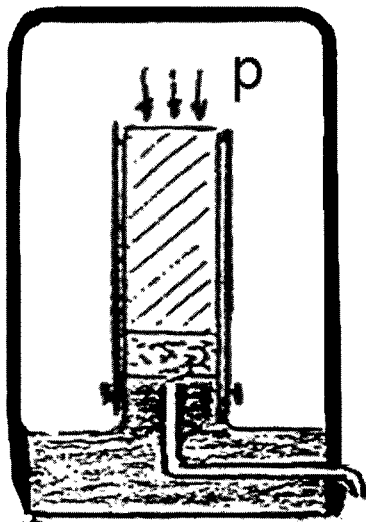


FIG. 1 Montage pour une mesure de la perméabilité.

Je proposais alors le montage de la figure 2, l'éprouvette étant toujours sous pression dans la chambre mais avec au milieu un trou axial borgne maintenu à pression nulle et un écoulement d'infiltration presque uniquement radial convergent, ce qui supprimait la gaine. Et, sans penser à mal, mais en pensant à l'économie du projet, j'ai dit : « Et si cela ne marche pas, on pourra toujours faire l'essai à l'envers, avec un écoulement divergent, la pression étant dans le trou borgne, avec le même matériel et la même formule pour le calcul de la perméabilité ».

Dès les premiers essais, les résultats furent transparents : le débit d'infiltration dépendait de la pression. Il décroissait en régime convergent lorsque la pression croissait et croissait en régime divergent. Il était évident qu'en régime convergent, la pression écrasait les fissures et qu'en régime divergent, elle les ouvrait (et

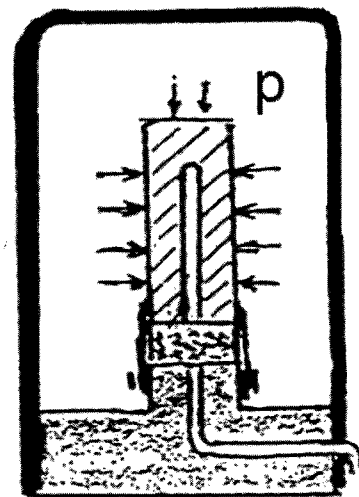


FIG. 2 Montage pour une mesure de la perméabilité sous un écoulement radial convergent.

même pouvait finir par faire éclater les éprouvettes !). Le coefficient de perméabilité  $k^2$ , variait d'une éprouvette à l'autre (dispersion) ; mais avec la même éprouvette le coefficient  $k$  variait en fonction de la pression et du mode de filtration (Fig. 3). Pour définir une valeur exprimant l'effet de la fissuration, un coefficient  $S$  fut choisi arbitrairement comme le rapport des perméabilités  $k$  sous  $-0,1$  MPa en régime divergent et sous

$$5 \text{ MPa en régime convergent } S = \frac{k(-0,1 \text{ MPa})}{k(5 \text{ MPa})}$$

$$^{(2)} \text{ Calculé par la formule } k = \frac{Q}{2\pi l p} \text{Log} \frac{R_2}{R_1} \text{ (en négligeant l'écoulement de l'eau à travers la partie supérieure de l'éprouvette) avec :}$$

$l$  longueur du trou borgne,  $p$  la différence de pression de l'eau entre l'extérieur et l'intérieur de l'éprouvette,  $Q$  le débit de l'écoulement de l'eau à travers l'éprouvette de rayons interne et externe  $R_1$  et  $R_2$  respectivement.

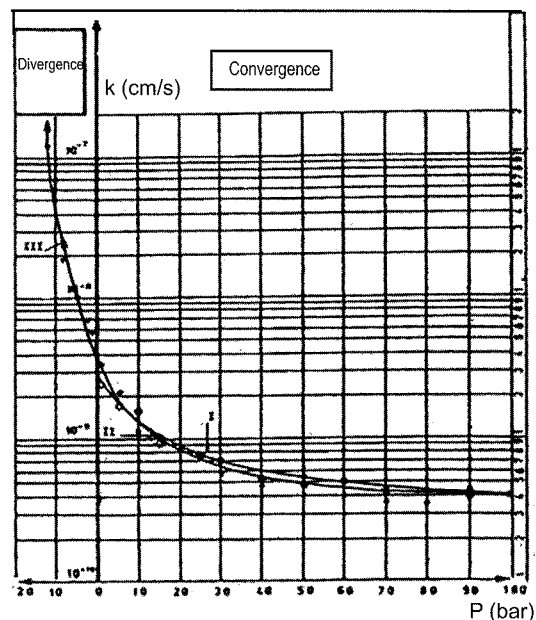


FIG. 3 Perméabilité en régime convergent et en régime divergent (d'après J. Bernaix, 1967).

Avec le gneiss de Malpasset la valeur de  $S$  pouvait atteindre 200 alors que dans tous les essais comparatifs effectués avec de nombreux autres matériaux (calcaire, granite, grès, quartzite, schiste) pour ceux qui étaient évidemment les plus fissurés,  $S$  était de l'ordre de 20, pour la plupart de l'ordre de 10 et évidemment égal à 1 pour des roches imperméables très compactes, sonnant clair au choc comme le calcaire de Saint-Vaast ou bien entendu aussi pour un métal fritte.

En définitive, le coefficient  $S$  paraît une excellente référence pour évaluer ou classer la fissuration d'une roche, voire d'un site. Cette méthode de classement paraît d'autant plus intéressante qu'elle est beaucoup moins onéreuse que les déterminations à partir de la résistance à la compression simple qui nécessite de très nombreux essais, donc de nombreuses éprouvettes dont la préparation exige une précision parfaite, que ce soit pour la statistique des résistances ou pour l'effet d'échelle.

Après ces essais EDF a confié au Laboratoire de Mécanique des Solides des échantillons de roches provenant de nombreux sites de barrages construits ou à construire. Les valeurs de  $S$  sont apparues normales (c'est-à-dire comprises entre 5 et 15) sauf pour un cas où des valeurs analogues à celles de Malpasset furent obtenues. Il s'agissait du site de Saint-Cassien où un barrage-voûte était prévu sur le même type de terrain que celui de Malpasset et qui, de ce fait, fut construit en enrochements.

Les essais de perméabilité en régime convergent puis en régime divergent sont apparus comme très adaptés à l'identification de la fissuration d'un massif rocheux *même en tenant compte de la dispersion des mesures de perméabilité*.

Mais de plus la sensibilité de la perméabilité aux contraintes de compression montre qu'une structure lourde, comme un barrage et son réservoir, peut apporter des contraintes importantes sous sa fondation et provoquer une diminution localisée de la perméabilité d'un massif très fissuré. Cela d'autant plus que la répartition des contraintes sous un appui contenant des discontinuités peut être très différente de celle qu'on connaît dans un solide continu.

La figure 4 obtenue à partir d'essais en modèles réduits et par photoélasticité sur un massif composé de strates horizontales, ainsi que la figure 5 analogue, mais pour un massif composé de morceaux assemblés comme les moellons d'une maçonnerie, et la figure 6 pour une autre configuration des moellons, montrent des concentrations de contrainte en profondeur tout à fait différentes de la répartition à 45° adoptée généralement pour le massif continu.

L'essai sur éprouvette tubulaire, au-delà de l'évaluation du niveau de fissuration de la roche dans un site, paraît donc particulièrement adapté pour suggérer des zones sous la fondation où la perméabilité peut se trouver réduite et former comme un rideau s'opposant aux infiltrations et, de ce fait, modifier la répartition des contraintes effectives sous la fondation d'un barrage.

Il est assez évident que ce qui s'est produit sur de petites éprouvettes, à savoir la diminution de la perméabilité sous l'effet d'une contrainte mécanique effective, est aussi valable à grande échelle dans un site rocheux présentant une fissuration naturelle d'une autre dimension que celle des essais en laboratoire.

Dans le cas du barrage de Malpasset, les contraintes dans le sol apportées par le poids propre de la

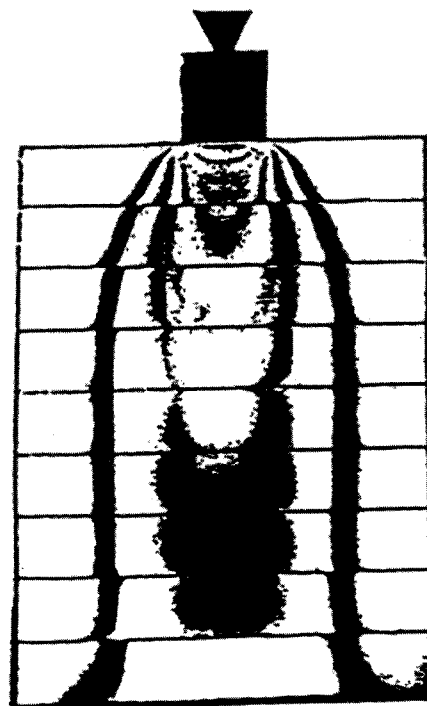


FIG. 4 Photoélasticité d'un milieu chargé en surface et composé de strates horizontales (d'après V. Maury, 1970).

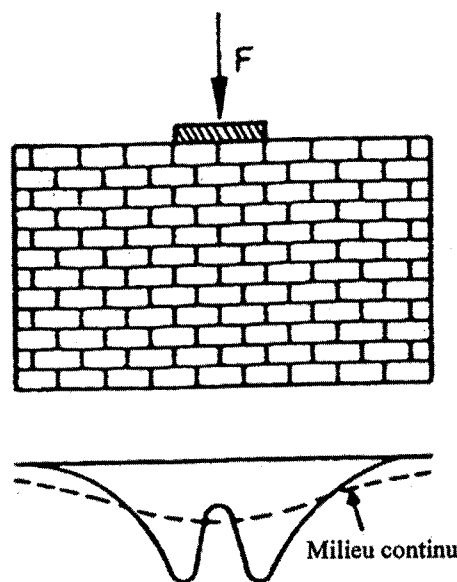


FIG. 5 Poinçonnement d'un modèle bidimensionnel discontinu (maçonnerie) (d'après J. Bernaix, 1967).

structure en béton et la poussée horizontale de l'eau sur le barrage étaient capables de créer à l'aval du site une diminution de la perméabilité du massif de gneiss inclinée vers l'aval, c'est-à-dire un véritable écran dans une zone particulièrement sensible. Un calcul a été fait par Jean Bernaix, sous la direction de Pierre Londé, qui a montré qu'avec des paramètres raisonnables de la résistance des roches, une rupture de la fondation pouvait se produire en tenant compte de la structure du massif et de l'appui de la culée en rive gauche. L'augmentation des pressions à l'aval dans le massif