

## QUELQUES OBSERVATIONS SUR LE MODE DE DÉFORMATION D'UN MASSIF ROCHEUX FRACTURÉ : LE VERROU DU LAC DE LA GIROTTE \*

par P. MAZENOT

Ingénieur, Division Technique Générale, Electricité de France, Grenoble

Le verrou rocheux qui retient le lac naturel de la Girotte et qui sert actuellement d'appui à un barrage de surélévation constitue un important massif rocheux soumis aux effets alternés annuels de l'exploitation de la retenue. Il est le siège de mouvements particulièrement importants et complexes. Le site de la Girotte se trouve ainsi être l'une des rares expériences dont on dispose pour étudier les déformations cycliques et irréversibles d'un important volume rocheux.

Les mesures des déplacements du rocher sont entreprises dans le cadre de la surveillance de l'ouvrage. Pour rendre plus efficace cette dernière, la recherche d'une connaissance du mode de déformation du verrou a permis de définir certains aspects rhéologiques du massif : déformations réversibles, élastiques ou non, effet de l'anisotropie de fracturation, effets différés, déformations permanentes.

La complexité du comportement mécanique du rocher, la diversité des causes, qui ne sont pas toutes reconnues ni mesurées, interdisent une interprétation précise des phénomènes.

### 1. — Morphologie, géologie du verrou. Dispositif de mesure

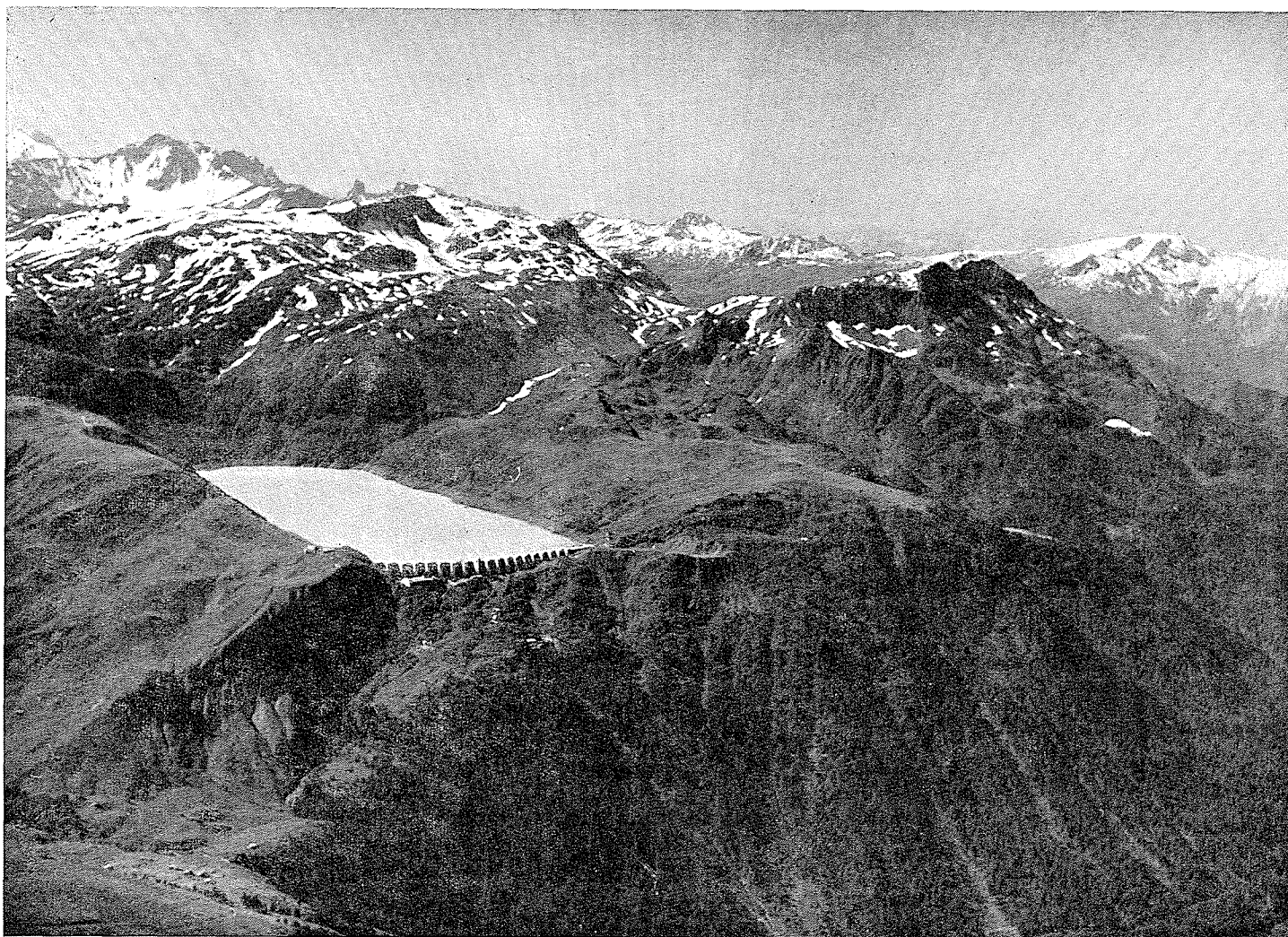
(figures 1 et 2)

Le seuil rocheux de la Girotte barre, à la cote 1 719 et sur 500 m de large, une vallée glaciaire suspendue. Le fond du lac naturel est à la cote 1 625. Les pentes amont et aval du seuil sont importantes (respectivement 100 % et 50 %) et elles isolent un dièdre rocheux de section particulièrement faible au centre de la vallée. Un barrage à voûtes multiples réhausse le seuil à la cote 1753,5. Les contreforts sont numérotés de 0 à 16, de la R.D. à la R.G. Enfin une galerie de soutirage permet la vidange du lac à la cote 1 645.

Le verrou est presque exclusivement constitué de schistes cristallins dont la matrice est très compacte. Mais une importante fracturation le recoupe suivant des failles grossièrement planes et à peu près parallèles au talus amont du verrou. Le massif rocheux est ainsi découpé en plaques de 10 à 15 m d'épaisseur séparées les unes des autres par des zones plus ou moins broyées, sur 10 à 50 cm, et souvent diffuses.

A la suite d'incidents qui ont souligné, dès les premiers remplissages à retenue normale, l'ampleur des mouvements dont le rocher est le siège, on a mis en place un dispositif de surveillance qui permet, en ce qui concerne notre propos, la mesure des déplacements amont-aval et verticaux du pied des contreforts, donc du sommet du massif rocheux. Ces points sont repérés par le numéro du contrefort correspondant. Les mesures topographiques ont une imprécision de l'ordre de  $\pm 1$  mm.

\* Communication présentée le 20 mars 1970 à la Session *Rhéologie et Hydrotechnique* de la Société Hydrotechnique de France.



1/ Le lac et le barrage de la Girotte vus d'aval.

## 2. — Courbes "charges - déplacements réversibles"

Les mesures exécutées ont montré que le verrou est soumis à des déplacements en majeure partie réversibles. Les déplacements réversibles atteignent une amplitude de 16 mm dans la partie médiane du verrou et s'annulent plus ou moins graduellement vers les rives. Ces mouvements sont en relation avec la charge hydrostatique mais on observe un retard entre le déplacement et la cote de retenue. La figure 3 montre ce phénomène lors des remplissages et vidanges de 1954 à 1957 qui ont été particulièrement surveillés.

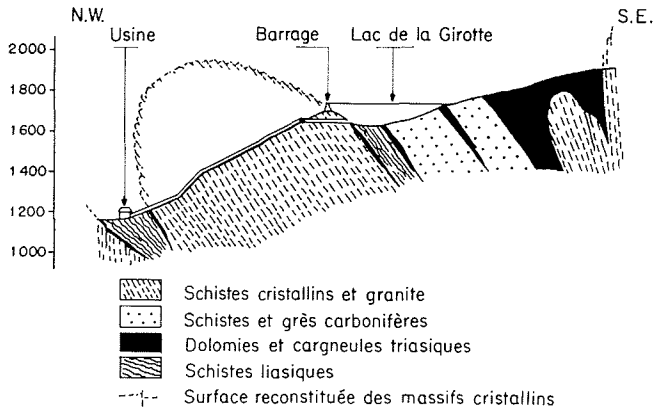
De façon à interpréter les mesures, on a cherché une expression analytique, simple, empirique, des courbes « cote de retenue — déplacements réversibles ». Pour cela, on a ajusté, par voie statistique, un polynôme de degré 6 de la cote sur les déplacements observés, soit  $D = f(H)$ . Le meilleur ajustement est obtenu en corrélant le déplacement, au jour J, avec la cote de retenue, au jour J — R, R variant suivant les points de mesure entre 15 et 25 jours.

La figure 4 donne, pour les différents points, la loi  $f(H)$ . On y remarque la faiblesse des déplacements pour les cotes basses, sans toutefois observer la classique déformation vers l'amont, puis une importante augmentation des déplacements en particulier pour les plus hautes cotes.

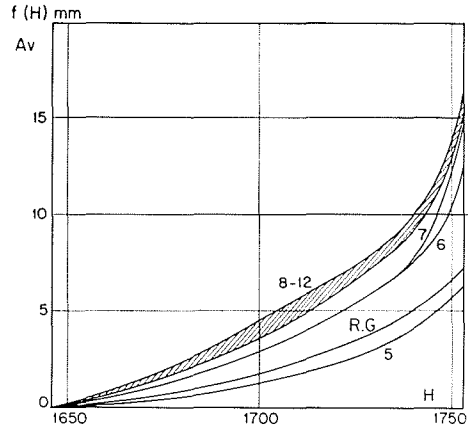
On a cherché à ajuster, sans succès, un modèle mathématique simple, par « la méthode des éléments finis », de façon à rendre compte des courbes  $f(H)$  observées aux contreforts 7 et 8.

On a d'abord supposé le verrou homogène et élastique avec un module E de 200 000 bars, valeur rencontrée fréquemment pour rendre compte des déformations d'importants massifs cristallins. Ce modèle montre (fig. 5), contrairement à la réalité, un déplacement vers l'amont de 2,5 mm aux cotes intermédiaires, puis un déplacement nul à retenue pleine. Pour remédier à ces deux discordances avec la réalité et de façon à être en concordance avec l'idée que l'on peut se faire de la « décompression » relative du seuil par rapport au massif rocheux plus profond, le calcul a été repris avec un modèle représentant le seuil comme très déformable ( $E = 50\ 000$  bars) reposant sur un substratum très rigide ( $E = 300\ 000$  bars). La figure 5 montre encore un important déficit des déplacements qui sont presque exclusivement localisés dans le seuil. Pour obtenir un déplacement élastique de 16 mm, il serait nécessaire d'introduire un module de 12 000 à 15 000 bars dans le seuil, ce qui est totalement incompatible avec la nature du rocher et l'ajustement d'autres déplacements connus du verrou (mouvements verticaux en particulier).

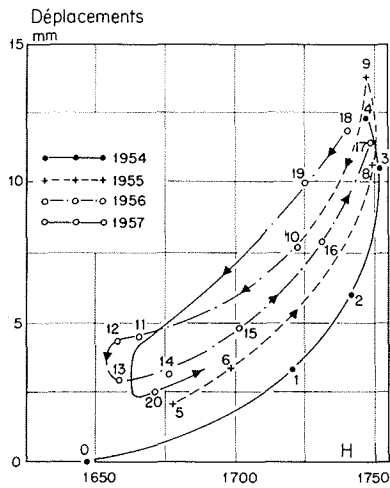
Les déplacements observés du verrou de la Girotte ne peuvent donc être simplement élastiques.



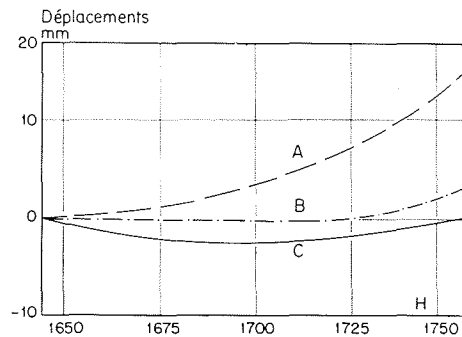
2/ Coupe géologique suivant l'axe du verrou de la Girotte.



4/ Courbes « charges-déplacements » :  $D = f(H)$ .



3/ Déplacements du pied du contrefort central 7, de 1954 à 1957, en fonction de la cote de retenue H.



5/ Déplacements du pied du contrefort 7 :  
 — A : Déplacements observés;  
 — B : Déplacements calculés avec un seuil à faible module ( $E = 50\ 000$  bars);  
 — C : Déplacements calculés avec un seuil à fort module ( $E = 200\ 000$  bars).

### 3. — Phénomènes d'anisotropie

Les amplitudes maximales observées des déplacements en divers points  $f(H)_{max}$  sont grossièrement corrélées avec l'épaisseur du profil du massif au point considéré; elles sont maximales au centre du verrou et s'amenuisent sur les deux rives où le seuil s'épaissit rapidement.

Dans le détail, on note, cependant, une rapide variation de  $f(H)_{max}$  entre les contreforts 8 et 5 là où les sections du verrou restent pratiquement de profil constant.

L'étude précise de la géométrie des failles montre que, dans cette zone, l'angle d'incidence  $\alpha$  des sections principales avec l'horizontale des failles en chacun de ces profils varie très rapidement de 45 à 100° entre les contreforts 5 et 12. Aussi peut-on penser que l'anisotropie de fracturation est à impliquer. La figure 6 donne l'amplitude de  $f(H)_{max}$  portée sur la direction  $\alpha$  des points 5 à 12. La figure est assez cohérente pour justifier l'interprétation. Elle donne une déformation 5 fois plus grande dans la direction normale à l'horizontale des failles que dans la direction parallèle. Les grands déplacements observés seraient donc dus à la possibilité de déplacements par glissement dans le « plan » des failles, les plaques se déformant élastiquement et, surtout, glissant les unes sur les autres de façon

libre, les mouvements étant cependant limités par l'encastrement en profondeur.

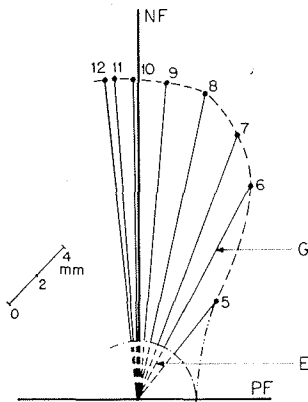
Revenant à la figure 6 et extrapolant la courbe d'anisotropie jusqu'à  $\alpha = 0^\circ$ , on imagine que pour cette incidence, seule apparaît la déformation élastique. Le déplacement s'ajuste d'ailleurs fort bien à celui d'un modèle élastique avec  $E = 50\ 000$  bars qui explique par ailleurs les déplacements verticaux. Pour les incidences  $\alpha \neq 0^\circ$ , il apparaît, de plus, un déplacement par glissement qui est largement prédominant pour  $\alpha = 90^\circ$  (13 mm sur les 16 mm observés).

C'est donc à ses particularités tectoniques que le seuil de la Girotte doit son originalité en matière de déformation. Ce sont elles qui expliquent l'échec des modèles élastiques.

### 4. — Effets différés dans les déplacements réversibles

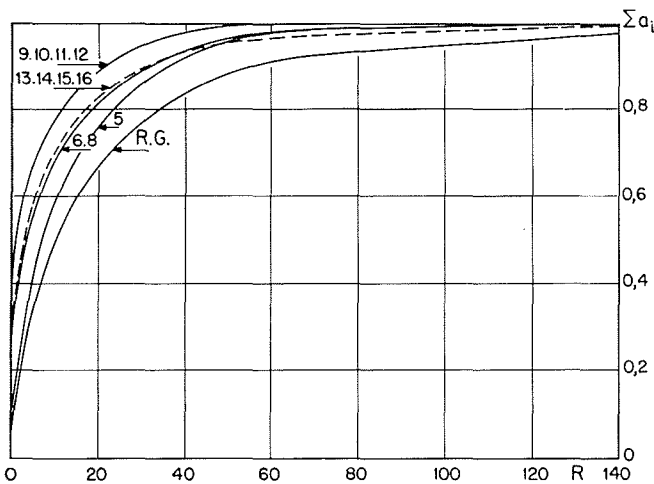
On a essayé de préciser le retard qui apparaît entre les variations des déplacements réversibles et celles de la cote de retenue.

Ceci a été obtenu par un découpage détaillé du temps, en admettant que le déplacement mesuré au jour J résulte



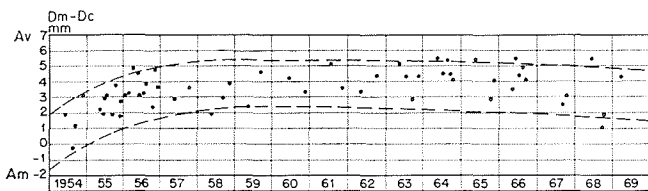
6/ Diagramme polaire des déplacements maximaux  $f(H)_{max}$  :

- PF : direction parallèle à l'horizontale des failles;
- NF : direction normale à l'horizontale des failles;
- E : déplacement élastique;
- G : déplacement par glissement;
- 7 : déplacement du pied du contrefort 7.



7/ Courbes cumulatives des coefficients  $a_i$  :

- $\Sigma a_i$  : somme des coefficients  $a_i$  ;
- R : retard (en jours);
- 7 : courbe relative au pied du contrefort 7.



8/ Ecart entre déplacements mesurés et déplacements calculés (évolution irréversible) du pied du contrefort 7, en fonction du temps :

- Av : aval;
- Am : amont.

de la superposition de divers états créés par l'application des charges dues aux niveaux de remplissage de la retenue lors des jours précédant J.

Si  $H_R$  est la cote de retenue R jours avant J, l'état correspondant se calcule par  $f(H_R)$  affecté d'un coefficient de pondération  $a_R$  à déterminer. On n'a pas cherché à vérifier si le principe de ces superpositions est légitime. On a seulement constaté le bon accord du modèle ajusté avec la réalité.

La déformation s'exprime alors par :

$$D_0 = a_0 f(H_0) + a_1 f(H_1) + \dots + a_n f(H_n)$$

Pratiquement, on a regroupé les termes  $a_i f(H_i)$  par tranches de temps judicieusement choisies de façon à réduire le nombre des inconnues  $a_i$  qui deviennent des coefficients moyens pour l'intervalle de temps :

$$i - \frac{i-h}{2} \text{ à } i + \frac{j-i}{2}$$

La figure 7 donne, pour divers points du verrou, les coefficients  $a_i$  sous forme cumulative. Pour le retard  $k$  on a porté la valeur :

$$S = \sum_{i=0}^k a_i$$

On constate donc un spectre de retards et non un retard simple comme on l'avait supposé en 2-. Aux retards les plus faibles correspondent les effets prédominants; les retards mis en cause sont plus importants sur les rives qu'au centre du verrou. Les courbes de la figure 7 correspondent à des courbes de « fluage » du modèle mathématique ajusté. En effet, si l'on applique un échelon  $f(H)_{max}$  de charge, en passant de la retenue vide au jour  $J-1$  à la cote maximale au jour J, le déplacement ajusté prend les valeurs suivantes :

$$D_0 = a_0 f(H)_{max}$$

au jour de la mesure,

$$D_0 = a_0 f(H)_{max} + a_1 f(H)_{max}$$

le lendemain,

$$D_0 = \sum_{i=0}^k a_i f(H)_{max}$$

$k$  jours plus tard.

Dans la pratique, les conditions des variations de charge qui ont servi à l'ajustement du modèle sont très différentes d'un échelon puisque l'exploitation de la retenue est annuelle.

Il serait, par contre, intéressant de connaître les causes réelles de cet effet différé. Les hypothèses suivantes sont possibles bien qu'aucune vérification simple ne puisse être envisagée.

L'interprétation des déplacements faite au chapitre 3 donne une influence prépondérante aux failles. Les frottements qui s'y localisent sont générateurs de retards bien qu'il s'agisse de phénomènes réversibles. Les déplacements apparaissent lors du remplissage; à la vidange il faut attendre que les forces de frottement aient suffisamment décré pour que les déplacements inverses puissent se réaliser sans mobiliser plus que l'énergie encore disponible dans le rocher. Le mouvement peut ainsi s'annuler complètement mais un cycle d'hystérésis apparaît inévitablement. La figure 3 montre bien ces cycles de déplacements.

Cela ne saurait cependant bien expliquer le fait que, au voisinage du remplissage maximal, le déplacement croisse encore tandis que la cote de retenue baisse déjà.

Il se peut qu'un comportement élastique différé soit localisé dans la matrice rocheuse. Mais il y a lieu d'ajouter que la retenue a pour effet secondaire d'alimenter une nappe aquifère qui suit la cote de retenue de façon partielle et avec retard. Il est difficile d'apprécier ce retard du fait de l'aspect ponctuel et de la dispersion des mesures piézométriques. Il est certain cependant que les charges apparaissent progressivement et s'appliquent, en partie, sous forme de forces d'écoulement à l'intérieur même du massif.

## 5. — Déplacements irréversibles

L'expression :

$$D_0 = a_0 f(H_0) + \dots + a_n f(H_n)$$

permet de calculer le déplacement réversible théorique en un point du verrou. Si  $D_m$  est le déplacement correspondant obtenu expérimentalement, l'écart  $D_m - D_0$  doit représenter, outre les erreurs de mesure et tout ce que le modèle n'exprime pas de la réalité, le déplacement irréversible du rocher.

La figure 8 donne la valeur des écarts en fonction du temps pour le point 7 au centre du verrou. On constate que la dispersion résiduelle, de 1,5 à 2 mm, n'est que légèrement supérieure à la dispersion des mesures topographiques particulièrement difficiles sur ce site. Ce résultat justifie, *a posteriori*, les hypothèses de superposition du moins en vue du but recherché qui est la surveillance précise des déplacements anormaux.

Au milieu de cette faible dispersion l'évolution du sommet du verrou, dans sa partie centrale, apparaît clairement, soit un déplacement vers l'aval de 4 mm entre 1954 et 1957 puis une stabilisation de 1957 à 1964, enfin une légère évolution vers l'amont depuis 1964. Sur les rives, du côté gauche en particulier, la première phase disparaît tandis que la troisième se manifeste plus tôt, dès 1957 ou même avant.

Le phénomène le plus intéressant est certainement la forte évolution vers l'aval observée dans la partie centrale du verrou, là où ce dernier est le plus mince. Ces déplacements ne sont connus que depuis 1954, les premières mises en eau à 1 753,5 ayant eu lieu dès 1950. Durant ces premières années d'exploitation du barrage de surélévation le seuil rocheux a dû évoluer de façon importante. Cette impression est confirmée par les remaniements internes du massif rocheux qui ont provoqué, en 1951, plusieurs ruptures du blindage de la galerie de soutirage à la cote 1 645, ruptures intervenues par cisaillement dans des failles.

Enfin, la comparaison des mouvements irréversibles horizontaux et verticaux montre que ces mouvements sont dans un rapport très voisin de la pente des failles principales. Il semble donc logique d'admettre qu'une grande part des mouvements irréversibles observés provient, elle aussi, des glissements entre plaques rocheuses. Une partie de ces mouvements de glissements n'a jamais pu être récupérée.

Ainsi, depuis l'époque glaciaire où le rocher s'était mécaniquement stabilisé et hydrauliquement colmaté, l'histoire du verrou de la Girotte est redevenue active du fait de l'exploitation de la retenue. Cette histoire est caractérisée par un comportement rhéologique complexe et bien imprévisible. Il s'agit d'un cas unique qui offre des déformations exceptionnelles dont, fort heureusement, la partie réversible semble parfaitement répétitive tandis que les évolutions irréversibles sont nettement stabilisées.

## Discussion

Président : M. RACT-MADOUX

M. le Président remercie M. MAZENOT et ouvre la discussion.

A-t-on fait des injections en vue de réduire les déformations, demande M. MALAN ?

On n'a guère cessé de faire des injections dans le verrou depuis 1953; leur effet sur les courbes donnant les déplacements observés en fonction de la cote de la retenue est peu sensible, répond M. MAZENOT.

Sur une question de M. le Président, M. MAZENOT indique qu'un réseau de drainage intéressant une partie du verrou a été réalisé en 1964. Ce drainage a été très efficace, il a produit un rabattement de la nappe d'une quinzaine de mètres dans l'étendue dudit verrou, il en est résulté un affaissement de 2 à 3 mm des repères de nivellement dans la zone centrale du barrage. C'est d'ailleurs à partir de ces mesures que l'on a calculé un module d'élasticité moyen de 50 000 bars pour la roche formant le verrou.

M. HABIB intervient en ces termes :

« Je crois que nous avons là une confirmation tout à fait parfaite de ce que la déformation d'un massif est essentiellement la déformation de ses fissures.

Par contre, je dois dire que je suis un peu étonné par l'interprétation faisant état d'un retard des frottements dans les fissures existant entre les bancs. Les déformations sont certainement très petites à l'intérieur des fissures et je conçois mal que l'on puisse avoir des phénomènes de retard aussi manifestes que ceux que l'on a pu voir sur vos courbes.

M. MAZENOT a mis aussi l'accent sur la possibilité d'un « retard hydraulique » et je crois que celui-ci est la raison principale du phénomène observé; il n'y a pas une visco-élasticité du massif, mais une « viscoélasticité » de la force appliquée à celui-ci. Cette explication est d'autant plus plausible que vos observations montrent des cycles vraiment répétitifs.

Je voudrais poser une question. à la suite du rabattement de nappe qui a été réalisé, a-t-on observé une certaine modification des cycles de déformation dans la zone où ce rabattement a été effectué ? »

Le rabattement n'intéresse qu'une assez faible portion du verrou, répond M. MAZENOT, on n'a observé aucune différence dans les déplacements horizontaux du verrou à la suite du rabattement, mais cela peut provenir de ce que les forces appliquées au verrou ont été peu modifiées par cette opération.

M. MAZENOT se défend d'avoir voulu donner une interprétation précise des phénomènes observés trop partiellement et pour les seuls besoins de la surveillance du barrage. Mais on a l'impression qu'il y a un retard entre les variations de déformation et les variations de l'ensemble des forces appliquées. Ainsi la déformation continue à croître lorsque la cote de la retenue s'abaisse après être passée par un maximum. Cela peut faire songer à un phénomène hydraulique mais d'autre part le niveau de la nappe est relativement peu en retard sur celui de la retenue et en tout cas beaucoup moins que les déformations observées.

Sur une question de M. le Président, M. MAZENOT précise :

« En réalité, on ne mesure pas le déplacement du pied des contreforts, on détermine les déplacements du sommet des contreforts qui résultent évidemment des déplacements du verrou, mais aussi des déformations du barrage. Par contre, nous disposons d'un système de pendules qui nous permet de faire la différence entre le déplacement du haut et du bas du barrage. Ce qui est très curieux, c'est que, pour la partie centrale du barrage, on constate que, si l'on joint les extrémités de ces deux déformations, elles viennent toutes concourir, en un point qui est à peu près la base du verrou. Il y a donc essentiellement un mouvement de rotation du verrou. »

M. HABIB juge ce résultat très intéressant; on pourrait en inférer — et ce serait plus rassurant — que les déformations varient proportionnellement à  $H^3$  et même moins et non à  $H^0$  comme il est indiqué dans le mémoire de M. MAZENOT.

Ce dernier répond que l'exposant 6 résulte seulement de l'ajustement des observations par un polynôme algébrique dont la structure ne représente pas forcément le mécanisme des phénomènes. Toutefois, il peut incliner les ingénieurs à la prudence; c'est ainsi, il y a quelques dizaines d'années, qu'un projet de surélévation de quelques mètres du barrage de la Girotte (en utilisant la compression des contreforts par des tirants de précontrainte ancrés dans le rocher) a été abandonné.

M. le Président lève la séance en remerciant les conférenciers et toutes les personnes qui ont fait des discussions un intéressant et fructueux dialogue.