

Rapport géologique

La mission qui m'a été confiée par la Commission d'enquête du barrage de Malpasset a été définie de la manière suivante par lettre du 15 décembre 1959 de son président :

J. GOGUEL

1) d'examiner l'ensemble des études géologiques et minéralogiques qui ont été exécutées avant la réception provisoire du barrage intervenue le 9 février 1955 pour les travaux prévus au marché initial et le 17 juillet 1956 pour les travaux supplémentaires prévus à l'avenant n° 2. Cet examen devra s'étendre notamment à tous les sondages, tranchées et fouilles qui ont été exécutés avant et pendant les travaux ; il portera essentiellement sur les fondations et les appuis du barrage et accessoirement sur l'ensemble de la cuvette du barrage ;

2) d'examiner l'état actuel des terrains dans la zone du barrage, du point de vue géologique et minéralogique et de comparer cet état actuel avec l'état antérieur à la rupture de l'ouvrage ;

3) de rechercher quels ont été les mouvements des sols de fondations et d'appui du barrage qui se sont produits au moment de la rupture, quels sont ceux qui auraient pu précéder la rupture et ceux qui en seraient au contraire la conséquence ;

4) de rechercher, dans le cas où certains mouvements auraient précédé la rupture, si ces mouvements étaient imprévisibles ou si certaines études et investigations auraient pu, avant ou pendant la construction du barrage en faire apparaître la possibilité ;

5) de dire quels seraient la nature, le programme et les méthodes de réalisation des études et investigations relatives à l'étanchéité et à la stabilité des fondations et des appuis d'un barrage-voûte qui permettraient d'obtenir toutes les garanties possibles de stabilité et d'étanchéité de ces fondations et appuis.

J'ai visité les lieux le 30 décembre 1959, du 18 au 21 février, et les 4 et 5 avril, et participé aux travaux de la Commission.

Le présent rapport rend compte des résultats des études qui m'ont été confiées.

Situation géologique

La structure générale de la région est classique ; elle est indiquée par les cartes géologiques, feuilles Antibes au 1/80 000 et Fréjus-Cannes au 1/50 000 actuellement sous presse (par Pierre Bordet) et, sans parler des travaux plus anciens, décrite par Pierre Bordet dans son mémoire « Étude géologique et pétrographique de l'Estérel », Paris 1951 (Mém. Carte). Les points essentiels en ont été contrôlés et repris par G. Corroy dans ses rapports en vue de l'étude du projet de Malpasset, et dans une publication qui reprend leur substance « L'alimentation en eau de la région orientale du département du Var et le barrage de Malpasset, près de Fréjus » (Trav. Lab. Géol. Marseille, E.V. 1956).

Je rappellerai simplement que, au milieu des gneiss du Tanneron, on trouve un synclinal nord-sud de dépôts carbonifères, qui donne lieu à une dépression morphologique très nette, partiellement occupée par la vallée du Reyran, et qu'utilise le tracé de l'autoroute. Mais, entre le pont du Buème et le pont de l'autoroute, par suite d'un rétrécissement du synclinal, qui est décroché par une faille, le Reyran se trouve traverser directement par les gneiss du Tanneron, d'où un resserrement de la vallée, qui ne pouvait manquer d'attirer l'attention lors de la recherche d'un emplacement de barrage.

Il n'y a aucune raison de mettre en doute l'imperméabilité de la retenue, qui occupait une vallée creusée, partie dans le gneiss, partie dans le Carbonifère ; un seul point demandait une vérification : le synclinal houiller, coupé par la faille qui va du pont du Buème à la cote 138,5 ne se prolongeait-il pas en direction du bas vallon de l'Avellan et des mines de Boson, dans des conditions qui auraient permis des infiltrations à travers les grès carbonifères ? J'ai vérifié que l'étranglement du synclinal au sud de la faille est à peu près total, et qu'une communication par les grès ne pourrait se faire qu'au-dessus de la cote de la retenue. Au surplus, si les grès carbonifères sont assurément moins imperméables que le gneiss, ils alternent avec des lits schisteux, imperméables, et ne peuvent donner lieu à la circulation d'un débit appréciable sur une distance notable.

La conclusion favorable du rapport de M. Corroy, quant à l'imperméabilité de la retenue, peut donc être adoptée.

Le site de Malpasset

En ce qui concerne l'emplacement même du barrage, une remarque préliminaire s'impose : à la suite de la catastrophe, le terrain s'est trouvé décapé sur une cinquantaine de mètres de hauteur, tant en amont, jusqu'au pont du Buème, qu'en aval jusqu'au pont de l'autoroute : toute la terre végétale, la partie décomposée du rocher, ont été enlevées, et la roche saine affleure complètement. Par contre le fond de la vallée est encombré d'alluvions transportées lors de la catastrophe, ou par le lac qu'elles ont déterminé, à une cote supérieure à celle de la vallée ancienne, dont le fond ne peut plus guère être étudié. Les tranchées de l'autoroute, qui fournissent d'excellentes coupes géologiques, n'existaient pas au moment de la construction du barrage, ni des études géologiques préliminaires. Il convient donc tout en profitant des conditions d'observation très favorables dont on dispose actuellement, de se souvenir de ce qu'étaient les conditions d'observation des affleurements au moment des études. On peut s'en rendre compte en observant le haut des pentes, où subsiste la végétation, et par analogie avec les autres ravins du Tanneron. La tranchée de la route, un peu en amont du barrage, fournissait un affleurement, et il semble, d'après le rapport de M. Corroy, qu'il en existait d'autres, assez étendus, sur les rives du Reyran, à l'entrée des gorges.

Les alluvions

Sur un point seulement, les conditions d'observation étaient plus favorables lors des études, qu'aujourd'hui : M. Corroy indique que la roche était visible par place au milieu d'un mince placage d'alluvions, dans le lit même du Reyran, ce que l'on ne peut plus vérifier, la région étant noyée, et sans doute recouverte d'alluvions. M. Corroy avait affirmé que les alluvions seraient d'épaisseur insignifiante à l'emplacement envisagé primitivement ; lorsque l'implantation définitive a été choisie, il a indiqué que les alluvions y seraient un peu plus épaisses, et a avancé pour leur épaisseur le chiffre de 5 m, qui a été remarquablement confirmé lors des fouilles, bien qu'il n'ait été établi qu'à partir des observations en surface, et n'ait donc constitué qu'une estimation¹.

Sur cette question des alluvions récentes, dont l'observation est devenue impossible, les déductions tirées par M. Corroy de ses observations ont donc été confirmées.

Versants de la vallée

Revenons aux flancs de la vallée : les quelques bons affleurements de l'entrée de la gorge, les escarpements rocheux visibles en haut des pentes, et certainement de multiples petits affleurements médiocres ou des blocs

¹ Par contre, le sondage n° 2, exécuté en janvier 1962 par l'entreprise Gaillard, indiquait une épaisseur d'alluvions plus forte, qui n'a pas été confirmée lors des fouilles, ce qui montre combien peut être délicate l'interprétation d'un sondage mécanique.

détachés au milieu des broussailles, suffisaient, sans autres travaux, pour affirmer la nature entièrement gneissique de la roche, du pont du Buème au pont de l'autoroute, et cette conclusion se trouve confirmée, aujourd'hui où une observation continue est possible.

La détermination de l'épaisseur exacte de terre, éboulis et schistes altérés, existant au-dessus du rocher sain, constituait l'une des préoccupations du géologue et des ingénieurs, au moment des études préliminaires. La comparaison des cartes stéréotopographiques avant et après la catastrophe, montre que cette épaisseur était régulière et modérée, comme les fouilles l'avaient déjà montré.

Cependant, il apparaît maintenant que cette couverture comportait par place des lambeaux d'alluvions anciennes, avec de gros galets à la base, qui majoraient d'autant son épaisseur. Il est possible de préciser aujourd'hui, que l'emplacement du barrage est un des seuls où n'existe aucun placage d'alluvions anciennes sur les rives. A l'emplacement primitivement envisagé, au-dessus de la tranchée de la route, il existe quelques lambeaux sur la rive droite, épais de 1 à 2 m au maximum, mais avec quelques gros galets. Il est douteux qu'ils aient affleuré, et la morphologie permettait difficilement de les deviner. Un autre lambeau existe, sur la rive gauche, à 100 m en aval du barrage, qui devait également être difficile à deviner. Ces lambeaux, très minces, devaient être plus ou moins cachés par les éboulis de pente ; ils auraient été mis en évidence, le cas échéant, par les fouilles prévues pour reconnaître la profondeur du rocher sain, et n'auraient eu sur celles-ci qu'une incidence insignifiante. Plus en aval, sur la rive droite, les alluvions anciennes sont plus développées, et leur présence avait été notée par M. Bordet.

Les rochers qui affleurent en haut des pentes, tant sur la rive droite que sur la rive gauche (cote 144,0), sont particulièrement escarpés, par rapport à ce que montrent les autres ravins de la région, dans des formations analogues. Ils devaient donner, à première vue, l'impression d'un gneiss particulièrement résistant. L'observation de la tranchée de la route ne pouvait que confirmer cette impression favorable.

Les reconnaissances préliminaires

On ne pouvait donc manquer, sur la vu des informations dont on disposait à la suite des études préliminaires, de donner un avis favorable à la construction d'un barrage. Il convient de noter que cet avis a été donné par M. Corroy sans préciser de quel type de barrage il s'agissait, mais nous savons que, au moment des reconnaissances auxquelles il a participé, on avait envisagé un barrage-poids évidé.

Dans sa première étude, M. Corroy avait d'ailleurs, dans son rapport du 15 novembre 1946, indiqué « que la série des gneiss du Reyran est loin d'être homogène et que les assises d'un futur barrage en ce lieu doivent être préparées par de sérieux travaux de recherche ». Le contexte de son rapport montre qu'il était préoccupé, en particulier, par l'aval pendage des gneiss, et par l'existence de filons de pegmatite.

Dès son intervention, le Bureau Coyne et Bellier envisageait de déplacer vers l'aval l'implantation initiale, et posait le 2 octobre 1950 certaines questions à ce sujet à M. Corroy (dont une question sur le choix de l'agrégat pour le béton, sur laquelle nous n'avons pas à revenir). Le déplacement envisagé répondait à

une double préoccupation : il s'agissait, d'une part, de se donner la possibilité de relever éventuellement la cote de la retenue, et, d'autre part, d'améliorer les conditions d'appui des extrémités du barrage. Pensant à un barrage-poids, il était naturel, lors des premières reconnaissances, que l'on s'attache aux épaulements à la base des versants, qui pouvaient faire gagner un volume notable. Au contraire, dans l'optique d'un barrage-voûte mince, ces épaulements perdaient de leur intérêt, tandis que les conditions d'appui des extrémités du barrage prenaient plus d'importance. Mais, si le changement d'implantation nous apparaît, *a posteriori*, comme une conséquence normale du changement dans le type de barrage envisagé, ce n'est pas sous cette forme que (au moins par écrit), la question a été posée au géologue.

Sur la possibilité de relever le niveau de la retenue, il a été indiqué une limite qui résulte essentiellement des points bas de la topographie (environ 128, d'après le plan directeur), avec une marge de sécurité, d'ailleurs sans justification précise, soit 110 m. On sait qu'il n'est pas apparu utile d'aller jusque-là.

Quant au déplacement de l'ouvrage, le géologue ne pouvait qu'indiquer que les conditions géologiques resteraient sensiblement les mêmes. On a vu plus haut qu'il a précisé l'augmentation d'épaisseur des alluvions. Quant au rocher, il s'est surtout attaché à en analyser les formes topographiques, abruptes à l'appui rive droite.

Si l'on s'était préoccupé de la qualité mécanique du rocher, on aurait pu être conduit à penser que les escarpements contre lesquels se fait l'appui rive droite indiquaient un rocher particulièrement résistant. Quant à la rive gauche, on sait qu'elle présentait une pente plus douce, dont la forme avait conduit à une culée, protégée du contact de l'eau par un mur en aile. Mais, dans l'axe de cette culée apparaissent des affleurements rocheux escarpés, qui occupent tout le haut de la pente. Les formes topographiques ne conduisaient donc pas à suspecter la présence d'un rocher localement moins résistant.

Le gneiss

La roche dans laquelle est creusée la vallée avait été définie par M. Corroy comme des embréchites (c'est-à-dire des gneiss injectés) tantôt massives, et même localement œillées, tantôt riches en éléments phylliteux, pauvres en feldspaths et à texture schisteuse. Cet ensemble, écrit-il, est « écrasé et haché de multiples failles... ». La roche est injectée d'une pegmatite à feldspaths roses...

Il n'y a rien à reprendre à cette définition, mais nous allons essayer de préciser maintenant la description de ces roches, et leurs variations locales.

Les pegmatites

L'abondance des pegmatites à gros feldspaths roses et mica blanc, injectées au milieu des gneiss, à l'aval du barrage, a frappé tous les observateurs qui ont vu les surfaces décapées.

A remplacement même du barrage, on trouve quelques-unes de ces grosses lentilles, mais il en existe de très petites, quelques décimètres seulement, dont la présence est beaucoup moins frappante, soit isolées,

soit au voisinage des corps de quelques mètres ou décimètres.

A première vue, ces pegmatites apparaissent comme des masses intrusives ; un examen plus approfondi montre qu'elles sont très souvent concordantes avec le gneiss, et que les lits micacés de celui-ci peuvent se poursuivre dans la pegmatite. La mise en place de celle-ci correspond donc plus à une imprégnation qu'à une injection, bien que ses contours soient en général très tranchés. Les bandes de pegmatites apparaissent comme très discontinues, en partie parce que l'injection même a été irrégulière, mais également parce que elles ont été interrompues et décalées par des failles, espacées de quelques mètres à quelques décimètres, et dont les rejets, lorsqu'on peut les apprécier, sont de quelques décimètres à quelques mètres, les rejets plus importants ne peuvent être estimés, faute de repères. Mais il semble bien que la formation de la pegmatite se soit poursuivie après le jeu de certaines au moins de ces failles. M. Corroy a signalé, dans la pegmatite, des recristallisations de quartz, consolidant des cassures de feldspaths par déformation tectonique.

La pegmatite prélevée dans les puits, au voisinage de la culée rive gauche, s'est montrée au microscope (P 2) très brisée, avec des zones finement broyées dans le quartz, des fissures remplies de calcite dans les feldspaths, et de la séricite dans les zones de broyage du quartz, et associée à la calcite dans certaines fissures. La présence de séricite était visible à l'œil nu, alors que les autres pegmatites paraissent ne pas en contenir. Cet échantillon a certainement subi, au cours de son histoire géologique, des dislocations mécaniques plus prononcées que la plupart des autres pegmatites.

Débarrassées de la terre végétale, et des produits d'altération (au sein desquels leur existence se manifeste par les grandes paillettes de mica blanc), les pegmatites nous apparaissent aujourd'hui comme généralement saines et résistantes. La crainte exprimée dans le rapport de M. Corroy que, en tant que roches à gros grain, elles se révèlent particulièrement altérables, ne se trouve donc pas confirmée.

Pétrographie du gneiss

Le gneiss, au milieu duquel ces pegmatites sont injectées, présente une série de caractères constants, mais en même temps certaines variations locales. Le fait que nous soyons amenés à insister sur ces dernières, ne doit pas faire sous-estimer les premiers.

Par sa composition, essentiellement : quartz, feldspath potassique assez frais, plagioclase généralement altéré, mica blanc et mica noir, orientés suivant la direction qui détermine la schistosité, cette roche appartient à un type très banal ; les minéraux accessoires (rutile, apatite, grenat rare, etc.) sont également d'un type courant. A l'œil nu, le gneiss présente tantôt un aspect œillé, avec des amygdales claires, quartzofeldspathiques, qui restent d'ailleurs de petites dimensions (15 mm x 4 mm pour fixer les idées), s'isolant au milieu de la masse micacée plus sombre, tantôt de simples lits minces quartzofeldspathiques, tantôt une répartition à peu près uniforme. On admet souvent que le faciès œillé indique l'apport d'un matériel étranger, au moment de la recristallisation de toute la masse qui a produit le gneiss ; cette notion ne se serait pas imposée ici. Ces différents types ne sont d'ailleurs pas tranchés, ils passent progressivement de l'un à l'autre, et il

est impossible d'en tracer les limites. Les faciès œillés sont assez constants dans les zones à injection de pegmatites, mais ils sont trop fréquents en l'absence de toute injection visible pour qu'on puisse affirmer une relation génétique. En bas de la rive gauche, immédiatement en amont du barrage, on trouve des gneiss œillés, alors qu'au contact, la roche sur laquelle était fondé le barrage était schisteuse. Les gneiss œillés, ou même simplement injectés lits par lits, sont ceux qui présentent, microscopiquement, l'apparence la plus saine. En l'absence d'injection visible, la roche présente un aspect plus schisteux et friable, qui explique que certains Ingénieurs aient pu parler de micaschiste. Mais, pétrographiquement, il s'agit incontestablement d'un gneiss².

On sait que la recristallisation qui a engendré le gneiss a dû se produire dans un régime de contrainte non isotrope. On ne s'expliquerait pas, autrement, l'orientation systématique des micas, qui se traduit par la schistosité. Mais le régime mécanique qui se traduit par cette contrainte n'a pas cessé avec la fin de la recristallisation. Il s'est souvent traduit par des ruptures, ou des déformations, des cristaux antérieurement formés. Et d'autre part, les possibilités de recristallisation des minéraux qui devaient tenir à la température, la pression, et peut-être à la composition chimique du fluide imprégnant la roche n'avaient pas disparu ; mais

⁽²⁾ La distinction des « gneiss » et « micaschistes » est très ancienne, bien antérieure à toute étude pétrographique précise, et il est certain que le sens de ces termes a dû évoluer, à mesure que progressait la connaissance des roches auxquelles on les applique. Néanmoins, leur emploi ne soulève pas d'hésitation pour un Pétrographe exercé, la présence d'un matériel quartzo-feldspathique abondant qui différencie le gneiss ne pouvant échapper, ni à l'œil nu ni au microscope ; l'expérience montre que le passage est généralement bien tranché. Il n'y a de divergence entre le diagnostic approché, à l'œil nu, et la définition pétrographique précise, au microscope, que lorsque le matériel feldspathique est essentiellement albitique ; on constate en effet dans le métamorphisme alpin, par exemple, que la cristallisation d'albite, qui détermine le faciès de la roche, peut se faire pour un degré de métamorphisme moindre que pour les autres feldspaths, et lorsqu'on se préoccupe avant tout de repérer les zones de métamorphisme (que l'on caractérise par le type de roche normalement formé), on convient parfois de ne pas tenir compte de l'albite dans la définition du gneiss. Mais cette difficulté n'existe pas ici.

elles pouvaient s'être modifiées, et conduire à la cristallisation de minéraux différents de ceux de la première phase. Même en l'absence de déformation mécanique, du fait du changement survenu dans des conditions physico-chimiques, il peut y avoir recristallisation de la substance de certains minéraux, en d'autres espèces minéralogiques. Cette recristallisation que l'on désigne souvent comme une altération est parfois incomplète et laisse reconnaître le minéral primitif (par exemple, les feldspaths plagioclases sont, ici, remplis de minuscules cristaux de séricite, et parfois de calcite et d'hydromicas).

Cette évolution du gneiss, postérieurement à sa cristallisation primitive, est un phénomène si banal, qu'il serait sans doute difficile de trouver des spécimens qui n'en montrent aucune trace, du moins à un examen attentif. Elle joue un rôle important ici, parce qu'elle a largement contribué à produire des différences locales, qui peuvent avoir eu une influence notable sur la résistance mécanique de la roche.

Tous les échantillons examinés, sans exception, montrent des traces de déformations ; mais parfois, la recristallisation qui les a réparées est très analogue à la cristallisation primitive : les cassures peuvent être réparées par du quartz bourgeonnant engrené (I) ; les cassures des plagioclases, par un feldspath potassique (adulaire) (B).

La cristallisation dans les fentes des plagioclases, d'adulaire et calcite (C, D) ou de quartz et calcite dans les fissures (B, D) indique déjà des conditions un peu différentes.

Fréquemment et surtout, semble-t-il, sur la rive gauche, à l'aval les fissures sont cimentées essentiellement par de la calcite (AGR, où l'on peut constater qu'il n'y a pas eu de déplacement le long d'une fissure de calcite, et qui par ailleurs est un peu broyé : 1GR, GAL1, GAL3).

La transformation de la biotite en chlorite est un phénomène assez général, qui détermine la teinte habituelle verdâtre de la roche. Cependant, cette transformation est liée à la déformation subie par le mica ; la chlorite peut même manquer pour certains des échantillons les moins déformés (I), ou être peu abondante.

TABLEAU Échantillons examinés au microscope.

Coord.	X	Y	Z	Observations
A	918	1 333	70	rive droite
B	894	1 291	80	rive droite, gneiss œillé
C	938	1 320	52	rive droite
D	993	1 285	53	fond du dièdre, près de l'extrémité du béton conservé
E	<i>id.</i>	<i>id.</i>	<i>id.</i>	<i>id.</i>
F	1 007	1 206	70	rive gauche aval, près du canal romain
G	905	1 287	72	mylonite
I	905,5	1 289	73	gneiss œillé au voisinage d'une lentille de pegmatite
J	1 093	1 166	102	route d'accès, gneiss œillé
K	960	1 270	44	fond du dièdre, bloc aval
AGR	929	1 295	-	prélèvement pour essai mécanique, rive droite
BGR	992	1 292	-	prélèvement pour essai mécanique, rive gauche, sous dernier béton conservé
GGR	1 052	1 235	-	prélèvement pour essai mécanique sous la culée rive gauche
1GR	956	1 215	-	prélèvement pour essai mécanique, fait sous l'eau, en aval rive gauche
GAL1	-	-	-	dans la galerie pour essais au vérin, schiste
GAL3	-	-	-	<i>id.</i>
P1	-	-	-	puits d'exploration, 5 m, schiste
P2	-	-	-	puits d'exploration, pegmatite

A côté de la chlorite qui prend la place de la biotite déformée, on trouve parfois une chlorite vermiculaire, dans les plagioclases (E), ou dans certaines fissures (BGR). La chlorite s'associe parfois à la calcite, dans le remplissage des fentes de broyage (1GR, P1).

Même en l'absence de déformation, les plagioclases altérés contiennent de la séricite, et parfois des hydro-micas, en petites paillettes dispersées dans leur masse, et parfois de la calcite, en larges taches. Il est peu vraisemblable que cette séricite, qui reste incluse dans les cristaux de plagioclase, ait beaucoup d'influence sur la résistance mécanique de la roche.

Il n'en est pas de même de la séricite qui apparaît parfois, liée aux déformations : soit dans les cassures, voire les fentes du quartz (K, BGR), ou le long des limites des cristaux. Un échantillon (K) montre une fente remplie de séricite parallèle, transversale, mais ses paillettes tapissent le plus souvent les cassures de la roche (E, 1GR, P2). Il est difficile de préciser le ou les minéraux aux dépens desquels s'est produite cette séricite, diffuse dans la roche, et qui nous apparaît beaucoup plus liée aux cassures, qu'à un minéral déterminé. Une préparation (K), montre de la sillimanite abondante, formée aux dépens de la biotite, et dont l'altération peut avoir contribué à la production de séricite.

Un échantillon (F) montre des microfissures qui, à l'inverse des précédentes qui ont été en somme réparées par la cristallisation de séricite, conservent l'aspect d'une ligne de broyage des minéraux, quartz et feldspaths étant un peu brisés suivant ces lignes, les micas disloqués et la biotite chloritisée. Seuls des dépôts ferrugineux soulignent leur tracé. Des fissures analogues, moins nettes, peuvent se deviner dans d'autres préparations.

La préparation BGR (prélevée au voisinage immédiat de la rupture de la roche de fondation) montre sur une partie de sa surface un broyage extrêmement poussé, avec une purée de grains de quartz noyés dans une pâte à séricite. Si un tel broyage, au lieu de n'affecter que les quelques millimètres où nous l'observons, au milieu d'une roche restée normalement schisteuse, s'était étendu sur des centimètres ou des décimètres, on classerait la roche comme mylonite.

Des ruptures ou des dislocations qui seraient plus tardives, et n'auraient pas été réparées par la recristallisation des minéraux, se traduiraient par une décohésion mécanique, déterminant la rupture des échantillons prélevés, ce qui empêche de les observer au microscope. Mais nous verrons que de tels accidents sont fréquemment visibles sur le terrain. Certaines des diaclases, selon lesquelles se divise la roche, sont cependant tapissées de calcite, et il y a donc un passage continu aux fissures cimentées par la calcite, que l'on observe au microscope.

On peut évidemment se demander à quoi tiennent les différences, dans la manière dont la recristallisation de la roche a réparé les dislocations qu'elle avait subies. S'agit-il, pour des déformations sensiblement contemporaines, de différences locales dans les conditions physico-chimiques ? L'extrême irrégularité des injections de pegmatite (lesquelles sont évidemment postérieures au gneiss, et témoignent de conditions physico-chimiques autorisant les plus larges recristallisations) permet d'envisager cette hypothèse. Mais il est également possible que les déformations se soient succédé dans le temps, pendant que se modifiaient les

conditions physico-chimiques ; l'étude des failles montre que ces déformations se sont poursuivies, alors que les recristallisations étaient devenues impossibles.

La répartition dans l'espace des différents modes de recristallisations qui ont été décrites ne permet que peu de conclusions nettes : les échantillons les moins déformés, ou les mieux recristallisés (B, I), proviennent du voisinage immédiat d'une lentille de pegmatite. Mais des recristallisations presque aussi parfaites (quartz, adulaire, avec un peu de calcite) s'observent en des points très différents.

La seule chose frappante est la localisation de la séricite dispersée (c'est-à-dire non incluse dans les plagioclases altérés), dans les échantillons D, E, K, BGR, P1, P2, dans la partie profonde du dièdre évidé de la rive gauche ; encore faut-il noter une différence sensible entre les échantillons D et E, prélevés à côté l'un de l'autre. Cette séricite dispersée explique d'ailleurs l'aspect microscopique des roches de cette région, avec des cassures finement lustrées, au toucher doux. Il n'est d'ailleurs pas question de tracer, sur le terrain, des limites tranchées entre les variétés que nous avons tenté de distinguer, et ceci pour plusieurs raisons : il y a vraisemblablement passage progressif d'un type à l'autre (les caractères analysés ne sont en effet pas exclusifs l'un de l'autre). La répartition originelle a été bouleversée par les nombreuses failles que nous décrivons plus loin. Et enfin, dans le fond du dièdre nous observons des roches relativement profondes (quelques mètres à dix mètres sous la limite d'altération) dont l'aspect diffère systématiquement de celles qui affleurent ailleurs, où elles ont été simplement débarrassées de la couverture altérée. On verra plus loin à propos des diaclases un exemple de cette différence systématique.

Néanmoins, le fait que l'étude pétrographique indique la présence de séricite diffuse dans la région du vide évidé de la rive gauche, et là seulement, a certainement une importante signification pratique.

On peut noter aussi le rôle que joue la calcite dans la réparation des fissures, essentiellement sur la rive gauche aval : les indications du microscope sont là facilement confirmées par l'essai à l'acide.

En reprenant les comptes rendus des sondages dits de reconnaissance, mais qui ont été exécutés en fait alors que le bétonnage était déjà commencé, avec comme objet essentiel de déterminer le degré d'imperméabilité de la roche, pour décider s'il y avait lieu d'exécuter le voile d'injections d'imperméabilisation qui avait été envisagé, on note, pour les quatre sondages dans la fondation du socle, ce commentaire : « Le micaschiste apparaît en général assez friable dans ce fond de vallée » (lettre Sondages, Injections, Forages, Entreprise Bachy, du 22 janvier 1954), qui s'oppose au commentaire relatif aux sondages exécutés sur rives : « Ils avaient pour but d'étudier la qualité et la perméabilité du rocher des rives, ces caractères pouvant notablement différer entre le rocher de fond de la vallée et celui des versants d'air. Ils ont montré que le micaschiste était notablement plus dur, sur les rives, et contenaient une plus forte proportion de rognons et filonets de quartz ».

Indépendamment des résultats relatifs à l'imperméabilité du rocher, qui a conduit à ne pas exécuter de voile d'injection, on peut se demander, *a posteriori*, s'il n'y avait pas là une indication sur la localisation des gneiss à séricite dispersée ; mais il n'y a pas lieu de retenir d'opposition suggérée entre roche du fond de la vallée, et des versants ; il n'y aurait aucune raison

pour qu'un type de roche obéisse à une telle localisation. Si l'on se reporte aux coupes de sondages, on constate que le pourcentage de carottes a été très faible dans tous les cas, vraisemblablement parce que l'objet même des sondages n'exigeait pas que l'on s'attache à en recueillir le maximum, et les indications pétrographiques sont beaucoup trop sommaires pour être utilisables. On ne peut donc pas dire si, en exploitant les résultats de ces sondages, il aurait été possible de préciser l'indication que l'on croit reconnaître dans les citations ci-dessus, et d'établir la localisation du gneiss à séricite.

Conséquences pour la résistance mécanique

Les cristaux du gneiss normal, quartz et feldspaths, sont directement en contact, souvent suivant des lignes très sinueuses (on parle de cristaux engrenés) ; on a l'impression qu'une rupture devrait traverser les cristaux eux-mêmes. Sans doute, les contacts avec les micas sont beaucoup plus simples, et ceux-ci doivent fournir des lignes de moindre résistance, mais ils sont parfois dispersés au milieu des autres minéraux, et de toute façon, les cristaux sont sains et massifs. On peut donc s'attendre à une résistance élevée à la rupture.

Il en est tout autrement lorsque la roche contient de la séricite dispersée, qui tapisse souvent les joints entre minéraux de ses fines paillettes soyeuses : on conçoit que le glissement de ces paillettes les unes sur les autres doit être relativement facile, ce qui doit abaisser beaucoup la limite de rupture.

Pour le gneiss normal, dont la résistance tient à la manière dont s'engrènent les minéraux, la présence ou l'absence d'eau dans les pores, d'ailleurs très peu abondants, ne doit pas changer grand-chose à la résistance mécanique.

Il n'en est peut-être pas tout à fait de même pour le gneiss à séricite dispersée. On sait que, si les pores sont partiellement remplis d'eau, il se produit des tensions capillaires, qui peuvent jouer un rôle notable dans la cohésion de la roche. Tel doit être le cas lorsque le gneiss a été partiellement desséché, sur les versants de la vallée, même sous une couverture altérée. Au contraire, pour la roche profonde, entièrement imprégnée d'eau, donc sans ménisques capillaires, cet effet ne doit pas se produire. Cependant, une rupture par séparation ou glissement des cristaux entraîne nécessairement une augmentation considérable du volume des pores, qui se traduirait pour l'eau qui les remplit par une pression négative, qui doit s'opposer à une rupture instantanée. Mais, si la contrainte est maintenue suffisamment longtemps, la pénétration de l'eau dans les pores, très lente, vu l'imperméabilité de la roche, doit permettre à la longue cette séparation des cristaux, qui se traduira finalement par une rupture³.

³ L'expérience suivante a été effectuée, après l'accident, par le Bureau Coyne et Bellier : un échantillon du gneiss à séricite, sec, a été plongé dans l'eau, et soumis à une pression de 17 kg/cm² pendant huit jours. Il est apparu comme relativement mou, et lorsqu'on le brisait, la fente apparaissait pleine d'eau. Je pense que, l'air qui occupait les pores ayant été comprimé et refoulé par l'eau vers le cœur de l'échantillon, s'y trouvait sous pression, et déterminait un fort gradient de pression de l'eau dans les pores, qui devait altérer profondément la cohésion. Une fissure nouvelle, atteignant une zone où l'eau se trouvait encore sous pression, celle-ci devait s'écouler très rapidement vers le vide ainsi créé, qui apparaissait comme humide. Après dessiccation, l'échantillon a d'ailleurs repris son aspect initial.

Il est à peine besoin de souligner le caractère hypothétique des considérations qui précèdent, fondées sur une interprétation théorique de la résistance mécanique du solide, et qui gagneraient à être confirmées par des expériences directes. On peut cependant retenir qu'il peut y avoir une relation entre les limites de rupture, immédiates ou différées, et la présence de séricite dispersée, compte tenu du régime de l'eau d'imprégnation.

Certains des blocs de gneiss à séricite, soit restés dans le fond du dièdre, soit transportés plus en aval, présentent des cassures, que l'on pouvait s'expliquer en admettant qu'ils avaient été abandonnés par le flot, reposant sur des points d'appui tels qu'ils subissaient des contraintes importantes. Mais, lors de ma dernière visite, on pouvait constater que les cassures s'étaient multipliées dans certains blocs ; certaines de ces cassures ne correspondent qu'à des contraintes faibles, les fragments détachés pouvant rester posés sur place. Il y a donc eu, en quatre mois d'exposition à l'air, une évolution sensible, sans doute appelée à se poursuivre. Il ne semble pas qu'une altération chimique des minéraux puisse en être responsable : la pyrite, qui existe par place, se retrouve non oxydée dans certaines des cassures spontanées. Mais la roche a dû perdre une partie de son eau d'imprégnation, et subir des variations thermiques susceptibles d'engendrer des contraintes superficielles notables. Ce sont là, pensons-nous, les facteurs essentiels de cette fissuration spontanée, qui peut prendre l'allure d'un effritement de la surface.

Les vitesses sismiques, mesurées sur le terrain après la catastrophe, sont apparues comme élevées, aussi bien pour le gneiss à séricite dispersée, que pour le gneiss normal.

On admet que l'on obtient pour les caractéristiques élastiques moyennes d'une roche massive, d'où dépend la vitesse du son, une approximation acceptable, en prenant la moyenne pondérée des caractéristiques élastiques des minéraux constitutifs. Or, la séricite dispersée ne représente, en volume, qu'une très faible proportion de la roche, quelques pour cent seulement ; on conçoit donc qu'elle modifie peu la vitesse du son dans la roche, du moment que celle-ci est compacte.

Par contre, la vitesse se trouve réduite, sur quelques mètres, au voisinage de la surface : ceci doit tenir surtout à ce que les fissures sont ouvertes, et à ce que fissures et pores sont peut-être incomplètement remplis d'eau.

Schistosité du gneiss

A l'œil nu, le caractère le plus frappant du gneiss est sa schistosité, et on constate que celle-ci comporte une linéation très marquée, si bien qu'en tout point, le gneiss comporte trois directions d'anisotropie. En gros, il y a une nette prédominance de pendages relativement faibles, en direction du S-W, la linéation ayant une direction W-S-W, qui paraît plus constante que le pendage. Celui-ci varie en effet beaucoup, soit par zones relativement vastes, oscillant d'une valeur un peu plus forte vers le Sud, à une valeur moindre vers l'Est, comme si, très grossièrement, la direction de la schistosité pivotait autour de la linéation. On observe aussi des plissements de la schistosité beaucoup plus serrés, visibles sur quelques mètres, mais ils sont relativement rares, leur axe peut être dirigé N-S.

Dans l'ensemble, et malgré la qualité exceptionnelle des affleurements, il ne m'a pas paru possible de dégager des règles générales, auxquelles obéiraient les fluctuations du pendage.

Les diaclases

La schistosité n'est pas la seule division mécanique de la roche, et celle-ci présente des diaclases, très développées dans certaines zones, où elles se succèdent à un intervalle de l'ordre du décimètre, très planes et parallèles, approximativement perpendiculaires à la linéation (par exemple, vers le bas de la pente, rive droite, en amont du barrage). Les affleurements sont alors littéralement hachés par les plans de ce système, mais la tenue générale du versant donne l'impression que la division ne doit pas être aussi marquée en profondeur, où ces plans de division doivent rester virtuels ; l'altération superficielle, à la base des éboulis ou de la terre végétale, a dû contribuer à manifester ces diaclases, qui ont limité les parties enlevées par le flot.

En beaucoup d'autres points, la roche massive, se divise en très gros blocs. Mais, un examen attentif permet parfois de reconnaître l'existence de diaclases virtuelles, le long desquelles la roche n'a pas perdu sa cohésion, mais qui peuvent faciliter la localisation d'une cassure. Cependant, nombre de cassures suivent des directions différentes, et ces diaclases virtuelles peuvent très bien ne pas jouer lors d'une rupture. En particulier, sur les gros blocs de gneiss à sérécite qui ont été plus ou moins déplacés au fond du dièdre, un examen attentif permet de reconnaître la trace de plans parallèles, le long desquels la teinte de la roche a viré du violet au vert, et qui doivent être l'équivalent des diaclases qui se manifestent au contact de la zone d'altération ; cependant, les blocs sont restés massifs, et les cassures ne tendent pas à suivre ces lignes.

Dans la galerie exécutée sur la rive gauche, aval, en vue d'essais mécaniques par l'EDF, la roche était si diaclasée qu'il a été impossible d'y recueillir de gros blocs ; beaucoup des diaclases étaient d'ailleurs cimentées par de la calcite.

Je serais donc porté à penser que les plans de diaclases, parallèles et relativement serrés, existent à l'état virtuel à peu près partout, mais ne s'expriment sous forme de discontinuités mécaniques, c'est-à-dire de véritables diaclases, qu'en certains points des zones d'affleurement, c'est-à-dire à l'approche de la zone d'altération, enlevée par le flot. En tout cas, l'aspect des cassures du rocher dans la zone critique du dièdre, et celui des blocs qui ont été transportés plus ou moins loin, montre bien que les diaclases n'ont joué aucun rôle dans la rupture.

Les failles

Il ne faut pas confondre avec les diaclases, régulières, serrées, et dont les flancs n'ont pas subi de déplacement relatif, les « multiples failles » dont la présence avait été signalée par M. Corroy et dont les pegmatites, lorsqu'il y en a, permettent d'estimer le rejet. On peut rarement faire plus de 5 m sans rencontrer une faille, dont le rejet peut être de l'ordre du mètre, et souvent plus. A des intervalles de quelques dizaines de mètres, se trouvent des failles beaucoup plus continues, et dont le rejet doit être plus grand, sans qu'on puisse l'estimer.

Le site de Malpasset paraît exceptionnel par l'abondance de ces failles, sans qu'on puisse dire s'il s'agit d'une particularité locale, ou si tout le gneiss du Tanneuron présenterait le même caractère, puisque l'état des affleurements ne permettrait pas de les reconnaître. En tout cas, les tranchées voisines de l'autoroute montrent la même particularité. Les gneiss des Maures sont nettement moins faillés, à l'est, et pratiquement dépourvus de failles, à l'ouest.

J'ai essayé de relever le réseau des failles existant au voisinage du barrage, et le même travail a été exécuté par le Service géologique de l'EDF, mais cette tâche s'avère décevante : il est impossible de reconnaître aucun plan systématique, aucune direction privilégiée. D'après le caractère plus ou moins accentué de leur tracé, et leur continuité, on est tenté de distinguer des failles majeures, et d'autres secondaires, mais il est impossible de les séparer d'une manière précise. Pour les failles secondaires, on peut hésiter à les distinguer de simples fissures, en l'absence de preuve de rejet. Néanmoins, lorsqu'il est possible d'en juger (par une injection de pegmatite, par exemple), on constate, en général, la réalité du rejet. Il existe des méthodes statistiques, qui mettent en évidence les directions privilégiées, lorsqu'il en existe. Nous n'avons pas voulu les appliquer, les incertitudes (poids à donner aux failles importantes, influence des conditions d'observation sur la probabilité d'observation d'une faille de direction donnée, etc.) nous paraissant de nature à ôter toute signification à un résultat éventuel.

Beaucoup de ces failles buttent les unes contre les autres, ou se ramifient d'une manière complexe, si bien qu'elles n'ont souvent qu'une longueur limitée. Mais quelques-unes sont au contraire très continues, et traversent toute la zone d'observation.

Certaines failles se traduisent par une simple discontinuité, interrompant d'une manière à peine perceptible la schistosité du gneiss. D'autres ont déterminé une certaine altération, ou un broyage, et après érosion, elles apparaissent comme une fente ouverte, parfois comme un faisceau serré de fentes séparant des esquilles rocheuses.

Certaines failles, et ce sont celles qui paraissent être les plus importantes, sont jalonnées par une mylonite, c'est-à-dire une purée de débris de roche, allant jusqu'à quelques centimètres, mais descendant aussi à l'échelle microscopique (éch. G), noyées dans une pâte, qui peut être relativement dure (certaines mylonites restent en relief après érosion) ou de nature franchement argileuse. Dans la galerie EDF, des mylonites se sont révélées très dures lors de la perforation, mais les blocs qui en étaient extraits se délayaient dans l'eau et perdaient par la suite toute cohésion. En général, les limites de la mylonite et du gneiss intact sont franches ; d'un côté, elles peuvent être marquées par une surface de discontinuité, comme si la lèvre gneissique avait glissé contre la mylonite. Parfois, la schistosité est froissée, sur une des lèvres, au contact d'une faille.

On peut naturellement se demander si toutes les failles sont du même âge, ou si elles ont joué au cours de plusieurs périodes distinctes. On peut mettre à part certaines failles qui paraissent contemporaines des injections de pegmatite ; les failles à mylonite sont évidemment plus récentes, mais il est difficile de dire si elles sont contemporaines des failles à lèvres franches.

Le cadre géologique général fournit quelques indications : on sait qu'un certain nombre de failles affectent

tent le Permien, au sein duquel les coulées volcaniques fournissent d'excellents repères. Ces failles, grossièrement N-S et E-W d'après les levés de P. Bordet, n'atteignent jamais la densité que nous constatons à Malpasset.

D'autres failles, antérieures au Permien, affectent le Houiller. Nous avons déjà cité celle du pont de Buème, qui décroche largement le synclinal, mais passe trop loin du site pour y avoir eu une influence quelconque. La continuité des bancs du Houiller, là où on peut l'observer dans de bonnes conditions (par exemple, tranchée de l'autoroute, au nord de la faille du pont du Buème), montre que les failles y sont certainement moins nombreuses que dans le gneiss. Cependant P. Bordet a été amené à en tracer un assez grand nombre, aux limites d'affleurement du synclinal ; on peut admettre que, lors du plissement qui a déterminé le synclinal, alors que les couches stratifiées du Houiller se plissaient d'une manière assez régulière, le gneiss, plus massif, réalisait la même déformation d'ensemble par une multitude de petites cassures de détail, dont beaucoup affectent l'extrême base du Houiller. Néanmoins, en comparant le degré de dislocation du gneiss et celui du Houiller, j'ai l'impression que la grande majorité des failles du gneiss doivent être antérieures au dépôt du Houiller, sans que rien permette une estimation d'âge plus précise.

On ne peut non plus dire si ce degré de broyage du gneiss correspond au passage d'une zone privilégiée, qui aurait pu préparer l'emplacement du synclinal houiller du Reyran, ou si c'est la trace d'un phénomène plus général, ayant affecté tout ou partie des gneiss du Tanneron (mais non les gneiss analogues des Maures).

La reconnaissance des failles

Si, aujourd'hui, il est impossible d'analyser clairement le réseau des failles qui apparaissent sur les flancs de la vallée du Reyran, il en était de même, *a fortiori*, avant la construction du barrage. Dans les conditions naturelles d'affleurement, il était impossible de les discerner. Des sondages n'auraient été d'aucun secours pour les repérer, les ruptures de carottes auxquelles elles auraient donné lieu étant ininterprétables. Sans des précautions extrêmes, que l'on n'a pas l'habitude de prendre pour des sondages dans le gneiss, il était impossible de carotter une mylonite (dont l'aspect aurait certainement paru alarmant). Dans les fouilles, certaines failles ont attiré l'attention (encore que les comptes rendus de visites soient difficiles à interpréter), mais on ne pouvait leur accorder qu'une signification locale, et elles ont été traitées en conséquence. Il apparaît, d'après la localisation de celles-ci, que l'on n'a pas dû y recouper de mylonites.

Il est vraisemblable que, si on avait étudié le rocher par un réseau étendu de galeries, on se serait rendu compte que les failles rencontrées n'étaient pas de simples fissures, comme en comporte toute masse rocheuse, mais des failles à rejet plus ou moins important, et ce fait (d'ailleurs déjà signalé lors de l'étude géologique préliminaire), aurait pu conduire à développer les travaux de reconnaissance, si on en avait eu le temps et les moyens.

Rôle des failles

On sait que l'une des conséquences les plus frappantes de la catastrophe a été l'enlèvement du terrain

sur la rive gauche, à l'intérieur d'un dièdre, dont les faces, planes, sont constituées par certaines des failles dont il vient d'être question. On ne peut donc manquer de leur assigner un certain rôle dans la catastrophe. Mais pour préciser celui-ci, il importe de rechercher ce qu'étaient ces failles, qui nous apparaissent aujourd'hui avec tant d'évidence.

Une distinction s'impose entre les deux faces du dièdre. Celle d'aval est constituée par un plan très continu, incliné de 40° vers N 10 à 15 W, qui comportait un revêtement de mylonite argileuse à débris, que l'on est un peu surpris de retrouver en place, malgré la violence de l'érosion. Ce plan se trouve dégagé sur une dénivelée atteignant, par places, 15 m, et sur près de 70 m de long. Il convient de noter, que, avant la catastrophe, il affleurerait à plus de 30 m en aval de l'ouvrage. Cet accident se prolonge sur la rive droite, où on l'observe facilement ; il passe à quelques mètres au sud du PC 91, et s'élève obliquement, jusqu'au-dessus du premier éboulis. L'épaisseur de mylonite est de 20 à 30 cm. Rien n'indique qu'il ait subi le moindre déplacement au moment de l'accident.

Dans son voisinage, il existe vers le bas de la rive droite d'autres accidents analogues, avec mylonite, l'un en dessous, plus incliné, et qui le rejoint à la limite de l'éboulis (qu'il contribue à déterminer), l'autre en dessus, plus plat, vers la cote 55.

On peut rapprocher de ce grand accident, d'autres failles analogues, de même direction, telle que celle qui coupe le canal romain à 30 m en amont du barrage, et qui apparaît sur toute la hauteur de la rive gauche. D'autres failles de même direction existent plus au nord.

L'autre face du dièdre n'est pas constituée par une faille unique, mais, pour une large part, par deux failles parallèles, inclinées d'environ 45° vers W 15° S.

Nous appellerons « faille amont supérieure » celle qui affleure le plus haut (entre 67 et 90), et va passer sous l'extrémité du mur en aile. Vers le haut (entre le mur en aile et l'escalier), elle n'atteint pas la surface conservée, mais se trouve coupée par une faille de direction N 30° W, plongeant fortement vers l'est ; au-delà de cette faille, la « faille amont supérieure », sans doute antérieure, ne se prolonge pas. On la voit également s'interrompre contre une autre faille, à une dizaine de mètres au N-W de l'extrémité de l'escalier. Au sud et S-W, elle est cachée sous les terres éboulées, sous la culée, ou des éboulis. On voit plonger sa surface entre les cotes 65 et 75, au nord, sous une masse rocheuse, dont toutes les fissures sont d'ailleurs ouvertes, et qui a donc subi un commencement de déplacement. On est là, très sensiblement, sous le parement amont, à peu de distance sous le fond de fouille.

Le plan de la « faille amont inférieure » est dégagé essentiellement entre les cotes 50 et 63. Son prolongement passerait à 4 ou 5 m au-dessus de la « faille amont supérieure ». Elle n'est pas non plus très continue, et son plan subit des décrochements de l'ordre du mètre au passage de deux accidents subverticaux, vers le passage du canal romain. Sa lèvre supérieure étant entièrement enlevée, nous n'observons pas son prolongement en pleine masse rocheuse ; mais l'observation est possible pour la faille supérieure, qui apparaît alors comme pas plus importante que les autres failles qui sillonnent le rocher en tous sens. On n'observe pas, sur ce prolongement, les mylonites, dont on relève cependant des traces en certains points de la surface.

J'estime que ces deux failles amont n'étaient pas plus importantes que celles qui sillonnent à chaque pas la masse rocheuse. L'une était certainement peu continue, au point que l'on peut se demander si elle affleurerait (bien entendu sous le manteau de terre et d'altération qui l'aurait cachée de toutes façons). Des failles d'importance comparable existent partout, avec les directions les plus variables. Ce qui a fait jouer à celles-ci le rôle que l'on sait, c'est qu'elles se sont trouvées à l'endroit, et avec la direction, qui pouvait limiter la rupture de la masse rocheuse.

Nous ignorons, bien entendu, si dans l'intérieur du dièdre rocheux aujourd'hui enlevé, il n'existait pas d'autres failles qui auraient pu jouer un rôle lors de la catastrophe.

On a vu qu'il était impossible d'envisager aujourd'hui, et *a fortiori*, alors que la surface n'était pas dégagée, une statistique des directions, susceptible de mettre en évidence celles qui auraient pu être dangereuses. On ne pouvait songer, d'autre part, à un repérage individuel de toutes les cassures, à plusieurs mètres sous les fondations, alors que ces failles auraient été presque impossibles à mettre en évidence par sondages. C'est plutôt sur un plan statistique qu'il y a lieu de tenir compte, dans l'appréciation de la résistance du rocher à la compression, de la possibilité qu'il y existe des failles de direction à peu près quelconque pouvant être continues sur quelques mètres ou dizaines de mètres.

Modifications consécutives à la rupture

Sur la rive droite, immédiatement à l'amont du barrage, on observe une crevasse béante, dont les flancs se correspondent, et indiquent un déplacement d'environ 45 centimètres vers la cote 55. Le fond de la fissure est caché par des matériaux éboulés. On a l'impression que le barrage serait descendu de quelques centimètres par rapport à l'amont.

Cette crevasse se poursuit, avec une largeur progressivement décroissante, jusqu'aux environs du joint D ; au-delà, quelques cassures du rocher se sont ouvertes de 2 à 3 cm.

Les premiers joints (A, B), sont très légèrement ouverts, un peu plus à l'amont qu'à l'aval, ce qui semble amorcer la rotation de l'ouvrage autour de son extrémité rive droite, que paraît indiquer la crevasse amont.

A l'aval sur la rive droite, on observe des fissures dans le rocher, à partir des environs du joint C. Ce sont des fissures franches, légèrement ouvertes, affectant une roche massive, sans qu'il y ait eu à leur emplacement d'amorce préalable. On observe parfois des joints anciens avec ciment injecté, mais les cassures dont il s'agit n'en montrent pas trace, ce qui prouve bien qu'elles sont postérieures à la construction. Ces fissures se raccordent avec les joints de construction du barrage qui sont ouverts, à la base du parement aval, de 7 mm pour C, 11 mm pour D, 4 mm pour E. Elles sont souvent multiples, anastomosées, avec un tracé très sinueux dans l'ensemble. Certains points de bifurcation, par exemple à la cote 57, sont fortement disloqués. Dans l'ensemble, elles ne s'écartent guère à plus de 5 m du pied du parement ; mais, étant donné la forte pente du versant, il est vraisemblable qu'on est là à la hauteur, si ce n'est en dessous, du fond des fouilles.

Étant donné les traces d'un déplacement vers l'aval que l'on observe de l'autre côté du barrage, on pouvait s'attendre à observer ici des traces de compression. Mais l'interprétation des cassures est loin d'être aussi claire : elles sont ouvertes, de quelques millimètres à quelques centimètres, et la composante longitudinale du mouvement qu'elles ont permis est très faible. L'analyse cinématique des cassures ne permet donc pas de retrouver le déplacement de 45 cm établi de l'autre côté du barrage.

Je me demande si les cassures béantes ne représentent pas surtout une réaction secondaire, consécutive à la disparition de la pression amont, alors que le déplacement du barrage s'était fait par cisaillement sur des surfaces plus profondes, peut-être sur des failles existantes, et serait peu visible en surface.

On sait que, pour la partie centrale du barrage, des déplacements de 60 cm (joint H), et 63 cm (PC 75, joint I) vers S 35° E, ont été mis en évidence par les mesures topographiques.

Au pied de la rive gauche, le contact du béton sur le rocher s'est trouvé dégagé, tant à l'amont qu'à l'aval, et on vérifie que le collage est parfait. Mais la masse de rocher ainsi solidaire du béton forme un bec, un bloc le sépare de la faille inférieure, dont on peut s'assurer qu'il est séparé de celle-ci par une fente, occupée par des matériaux rapportés, de même qu'il est séparé du bec portant le barrage par un vide analogue. On retrouve donc bien ici la trace du déplacement de la partie centrale du barrage, ce déplacement faisant d'ailleurs un angle faible avec la direction de la faille inférieure.

A l'aval, le fond du dièdre est occupé par un certain nombre de gros blocs, dont on peut affirmer qu'ils sont sensiblement en place, car ils se raccordent les uns aux autres, mais ils sont séparés par des vides béants (environ 45 cm au nord du bloc aval, cote 49,87) qui sont obliques, les blocs se soulevant en direction de l'aval. Pour que la masse constituée par ces blocs ait pu encaisser le mouvement du barrage vers l'aval, il faut qu'ils aient été plus ou moins soulevés, avant de retomber à leur place actuelle. D'ailleurs, le vide qui s'étend au pied du barrage à 8 m à l'E de l'angle de la chambre de commande des vannes, sur une hauteur inconnue, puisqu'on n'a pas sondé le lac, s'est produit par arrachement d'une masse rocheuse lors de la catastrophe.

Il importe peu de savoir, des derniers blocs qui occupent le fond du dièdre vers l'est, lesquels sont quasi en place, et lesquels sont tombés de plus haut.

Le dernier béton conservé était peu éloigné du joint K. La partie inférieure des deux plots KL et LM a pu être identifiée, au-delà du coude du Reyran, et on constate qu'ils sont restés d'un seul tenant, sur toute leur largeur et près de 10 m de hauteur au-dessus des fondations, celles-ci sont pratiquement intactes, avec le gneiss collé au béton coulé dans les fouilles. La partie manquante de la fondation du plot JK a été trouvée également très loin, au-delà du pont de l'autoroute. La roche restée collée aux fondations est très analogue à celle que l'on peut observer à l'intérieur du dièdre.

Ce n'est donc certainement pas une rupture du béton de la base du barrage qui est à l'origine de la catastrophe, et il semble permis de conclure que la base de ces plots n'a pas été soumise à une concentration exceptionnelle d'efforts.

Des morceaux importants des fondations des plots suivants (MN, NO, OP) ont été reconnus plus en amont,

avant le coude du Reyran, tous avec le rocher sain, parfaitement collé au béton de fondation.

Enfin, on sait que la culée, à partir du joint Q, est restée en place, mais avec un déplacement de 2 m environ, en direction S 10° E, et que le mur en aile, brisé en plein béton à son raccordement avec la culée, n'a subi qu'un déplacement beaucoup plus faible.

Le bloc PQ (culée et son raccord avec le mur en aile) est tombé au fond du dièdre, vraisemblablement vers la fin de la catastrophe, car on n'y relève aucune trace de l'action de la crue.

L'échantillon CGR, prélevé sous la culée, c'est-à-dire sous le prolongement de la faille supérieure, montre un gneiss œillé, relativement peu déformé.

La Danaïde, tranchée par le flanc aval du dièdre comportait un mur en béton armé, dirigé vers le haut, suivant la pente, qui a été tordu dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, et rabattu vers le bas : ce n'est donc certainement pas sous l'action des eaux, mais de l'éboulement du remplissage de la partie haute du dièdre, éboulement provoqué d'abord par l'érosion du contenu de la base du dièdre, mais également par la poussée des terres refoulées dans le mouvement de la culée. L'examen de photos prises au lendemain de la catastrophe montre que des éboulements de terre, dans le prolongement du dièdre, ont encore eu lieu par la suite.

Déroulement de la rupture

Ce n'est qu'à titre d'hypothèse, en l'absence de toute information directe, que l'on peut essayer de reconstituer la succession des phases de la catastrophe.

Les différents déplacements constatés sur la rive droite et la partie centrale, d'une part, la culée de l'autre, ne sont pas rigoureusement ceux d'un solide invariable, mais ils sont cependant à peu près compatibles. L'écart peut s'interpréter par une légère ouverture de l'arc au cours du déplacement, ou en supposant que le déplacement de la partie centrale a été supérieur à ce qu'on observe aujourd'hui, mais qu'après disparition de la pression amont, il s'est produit un certain retour en arrière.

Ceci conduirait à penser qu'il y a eu, dans une première phase, déplacement d'ensemble du barrage. Il est certain qu'un tel mouvement n'a pu se produire que par cisaillement du rocher, au-dessous des fondations. On peut se demander si ce mouvement n'avait pas commencé à s'ébaucher un peu avant le 2 décembre. Les sources apparues sur la rive droite pourraient avoir été dues à des fissures passant sous les fondations, et qui devaient donc déboucher au jour à une certaine distance du parement. L'absence de source analogue sur la rive gauche, où le mouvement devait être plus ample, pouvait tenir à ce que le rocher, moins résistant, sans pegmatites, s'écrasait plus complètement, sans fissures restées béantes. La fissure signalée au parement rive droite du bassin de réception peut, après coup, être considérée comme témoignant aussi de ce mouvement préliminaire.

Mais l'amplitude de celui-ci ne pouvait être qu'une très petite partie du déplacement total constaté. Lorsque celui-ci s'est produit, les phases ultérieures devaient se succéder en quelques secondes.

Le cisaillement d'une grande masse rocheuse se fait, partie par rupture de la roche massive, partie par jeu le

long des fissures qui préexistent toujours, et dont on a vu qu'elles étaient ici très nombreuses et de directions variées. Les deux failles amont, en particulier, étaient placées de manière telle qu'elles devaient nécessairement jouer. Le déplacement se faisait sensiblement suivant leur direction, c'est-à-dire par un glissement horizontal, comme on peut s'en rendre compte pour la culée.

Cependant, dans un mouvement d'une telle amplitude, les fissures qui s'ouvraient, parce que obliques sur la direction du mouvement, ou par défaut de plasticité, ne pouvaient manquer d'offrir un passage à l'infiltration de l'eau, qui allait soulever, puis raviner et entraîner la masse rocheuse qui se trouvait en avant du barrage. Une partie des fondations, entre les joints K et, peut-être N, O ou P, allait se trouver dépourvue d'appui. La base des plots, avec les fondations, devait alors se détacher et être entraînée par le flot, en blocs de très grandes dimensions. Le reste de l'ouvrage suivait immédiatement.

Les récits des témoins établissent que, à deux ou trois kilomètres en aval, la montée de l'eau s'est produite en deux vagues successives, à quelques secondes d'intervalle. S'il ne s'agit pas seulement d'un effet hydrodynamique, dû au double coude du Reyran, ces deux vagues pourraient correspondre au départ des plots de fondation, puis à la ruine du reste de l'ouvrage.

Ce n'est qu'un peu plus tard que le contenu de la partie supérieure du dièdre, non soumis à une érosion directe (ce qui laisse supposer que les plots NO et OP ne sont pas partis les premiers), s'est éboulé par sapement de sa base, et plus tard encore que le plot PQ s'est effondré.

Le schéma que je propose comporte, évidemment, une sérieuse part d'hypothèse, et on pourrait lui apporter de nombreuses variantes. Le point essentiel est l'idée que le déplacement d'ensemble a précédé la rupture.

Envisageons l'hypothèse inverse : à la suite de la rupture de la rive gauche, la partie centrale et de droite de la voûte, privée d'appui, et encore soumise à une partie de la pression de l'eau, se serait déplacée. On serait alors conduit à chercher la cause de la rupture sur la rive gauche et, étant donné le relativement bon état des blocs de fondation qui ont été retrouvés, on incriminera nécessairement la culée dont le déplacement spectaculaire frappe immédiatement tous les observateurs. Soumise à la pression des arcs supérieurs, la culée, en cédant, devait entraîner leur rupture dans son voisinage, c'est-à-dire entre N et P pour fixer les idées. Le ravinement aurait alors commencé par la partie haute du dièdre, et le reste de l'ouvrage aurait été détruit progressivement, par érosion de haut en bas, ou par sous-cavage du parement aval. Il semble que, dans une telle hypothèse, les traces ne seraient pas celles qu'on relève actuellement. Le bloc PQ se serait écroulé l'un des premiers, et aurait été entraîné au loin, et les blocs inférieurs, KL, LM, et l'extrémité de JK, partis en dernier, auraient franchi la plus faible distance : or, KL et LM ont dépassé le tournant du Reyran, et l'extrémité de JK se trouve devant la mine de Boson, à près de 2 km.

Il me semble donc que la première hypothèse est, de loin, la plus vraisemblable, et ce sont ses différents aspects que j'envisagerai ci-après.

Rôle de certains facteurs

Une question se pose immédiatement : quel a été le rôle exact de la faille aval du dièdre ? bien que son prolongement ait passé à 15 m sous les fondations, a-t-elle contribué au glissement en masse de l'ouvrage et de ses fondations ? Pour la rive droite nous pouvons répondre formellement par la négative, et il paraît vraisemblable que, sur la rive gauche, le déplacement en masse a pu se faire en n'intéressant qu'un volume rocheux bien moindre. Le rôle de la faille aval me paraît être d'avoir limité l'érosion du dièdre, les blocs qu'elle délimitait ayant pu être arrachés par le flot, qui mordait difficilement sur sa surface lisse.

Quel a été le rôle des sous-pressions ? On a vu qu'il n'a pas été signalé de source sur la rive gauche, dans les jours qui ont précédé la catastrophe. Si, comme on peut le penser, les mouvements préparatoires étaient aussi amples, au moins, que sur l'autre rive, cela peut être interprété comme indiquant que le rocher s'écrasait sous l'effort de manière à rester étanche. Mais, étant donné le couple exercé par le barrage à l'encastrement, cet écrasement devait être plus marqué sous le parement aval, que plus à l'amont, et ceci permet de craindre que la pression interstitielle de l'eau, sous le barrage, ait été plus proche de la pression amont que de la pression aval. Ou du moins, dans la mesure où la déformation de la roche impliquait une augmentation du volume des pores, la pression de l'eau tendait, à la longue, à s'y établir à une telle valeur.

L'importance du rôle de la sous-pression tient peut-être surtout au délai qu'elle a ainsi entraîné, entre l'établissement des contraintes, et la déformation du terrain, restée lente dans une phase préparatoire. C'est ce facteur, en particulier, qui explique que la rupture se soit produite à un moment où la charge n'augmentait plus, mais tendait à diminuer, à vrai dire très lentement et depuis peu de temps.

Pour un barrage aussi mince, les efforts totaux résultant de la sous-pression sont relativement petits, par rapport aux efforts produits par la poussée directe. Néanmoins, il n'est pas tout à fait exclu que, en leur absence, la résistance du rocher aurait été suffisante pour que la rupture ne se produise pas. En d'autres termes, s'il avait existé un voile d'étanchéité par injections, convenablement disposé, et si le rocher situé à l'aval de ce voile, sous les fondations avait été convenablement drainé, les efforts supportés par le rocher seraient peut-être restés inférieurs à sa résistance, mais de peu. Il n'y aurait peut-être pas eu de catastrophe, mais le coefficient de sécurité serait resté trop voisin de l'unité.

Si la sous-pression joue un rôle, à vrai dire limité, on peut se demander si l'imprégnation du terrain par les pluies exceptionnellement fortes de fin novembre ne peut pas également être incriminée. Il faut, me semble-t-il, distinguer dans cette question deux aspects : la terre végétale, au pied du parement aval, étant gorgée d'eau, la pression hydrostatique sur les fissures du rocher sous-jacent se trouvait accrue de quelques mètres au plus ; par rapport à la différence de pression entre la retenue et l'aval, différence responsable des circulations le long desquelles se produisaient les sous-pressions, cette différence est négligeable.

Et, d'autre part, les pluies tombées sur les collines, au-dessus du niveau de la retenue, peuvent théoriquement gonfler la nappe profonde, éventuellement por-

ter sa pression hydrostatique au-dessus de celle de la retenue, et modifier les circulations profondes. Mais ce facteur n'a pu jouer dans le cas présent, parce que le gneiss est très imperméable, et sans doute dépourvu de toute circulation profonde, et parce que la surface de colline située au-dessus du niveau de la retenue est dérisoire, surtout sur la rive gauche.

Pour comparer la résistance du rocher, qui s'est révélée insuffisante, aux efforts qui s'exerçaient sur lui, on voudrait connaître la valeur exacte de ceux-ci. Mais une difficulté se présente : les procédés classiques de calcul des réactions des appuis et des contraintes intérieures, supposent le terrain élastiquement homogène. Lorsque le terrain commence à se déformer localement, cette hypothèse n'est plus valable, et on a l'impression que la manière dont les efforts sont transmis au terrain par le barrage doit être notablement modifiée. Je souhaiterais que l'étude des calculs de barrages, à laquelle les machines électroniques ouvrent des possibilités nouvelles, ne néglige pas le problème, de déterminer ce que deviennent les contraintes transmises au terrain, lorsque certaines parties de celui-ci subissent de petits déplacements.

Conclusion

On a vu que la masse gneissique dans laquelle est creusée la vallée du Reyran présentait selon les points certaines variations dans sa nature, variations relativement secondaires du point de vue géologique, et dont toute autre série métamorphique permettrait sans doute d'observer l'équivalent. Mais ces variations paraissent avoir eu une incidence notable sur la résistance mécanique spécifique.

Il est impossible de dégager des lois auxquelles obéirait la localisation de ces variations, parce que nous ne savons pas comment se localisaient les fluctuations dans les conditions de recristallisation d'où elles résultent, et parce que la disposition primitive des diverses variétés de gneiss a dû être bouleversée par le jeu des failles. Ces variations ne peuvent être traitées que comme un phénomène aléatoire.

Par ailleurs, et le fait avait été signalé lors de l'étude préliminaire, le gneiss est haché par un nombre exceptionnellement élevé de failles, de directions extrêmement variées. Toutefois, il est assez fréquent qu'une roche massive soit sillonnée de fissures et de diaclases, à vrai dire, de directions souvent plus régulières, qui compromettent la continuité mécanique du rocher, et l'existence de ces failles ne créait pas des circonstances radicalement anormales.

Je pense, que, plus qu'aux discontinuités mécaniques de la roche résultant des failles, la rupture survenue dans le terrain est due à la faible résistance mécanique que présentait localement, en une zone où les sollicitations exercées par le barrage étaient particulièrement élevées, un gneiss qui se trouvait contenir de la séricite dispersée.

Aucune règle géologique ne permettait de prévoir la localisation de cette particularité, qui ne peut, cependant, être considérée comme ayant un caractère exceptionnel.

Le mot « gneiss », en effet, s'il correspond à certains caractères généraux de la composition pétrographique, tenant à une phase à vrai dire essentielle de l'histoire de la roche, peut désigner des roches très

différentes, soit par suite des variations de composition des roches soumises à un même métamorphisme (cela ne paraît pas être le cas ici), soit par suite des modalités des phases successives du métamorphisme et des déformations tectoniques. Si les Géologues l'emploient, c'est faute de pouvoir, le plus souvent, dégager les lois auxquelles obéissent ces variations (encore qu'ils s'efforcent de le faire, lorsque les circonstances le leur permettent). Mais, pour n'être pas (ou du moins, pas encore) justiciables de lois qui permettraient de prévoir leur répartition, ces variations n'en existent pas moins ; il convient, pour éviter le renouvellement de semblable catastrophe de s'en préoccuper, et de chercher, à défaut de pouvoir prévoir leur répartition, à les déterminer empiriquement, par des prélèvements systématiques d'échantillons et par leur étude méthodique, tant pétrographique que mécanique.

Un point essentiel est d'éviter que le mode de prélèvement n'exerce une première sélection, et ne fournisse que les échantillons les plus résistants, alors que ce sont évidemment les moins résistants qui importent. Des méthodes de sondage appropriées permettent, actuellement, de carotter à près de 100 % des formations tendres, comme les couches de charbon dans le Houiller. Elles fourniraient, *a fortiori*, un résultat analo-

gue dans les séries métamorphiques. Des techniques commencent à se développer à l'étranger, qui permettent d'examiner les parois du sondage : elles permettraient de se faire une idée sur ce qui a pu échapper au carottage, et en particulier, de déterminer la direction des fissures.

Mais les sondages, même exécutés dans les meilleures conditions, ne dispenseront pas toujours de l'observation directe du terrain, en galerie. Ceci peut permettre l'exécution d'essais mécaniques sur le terrain non dérangé, essais dont la technique doit pouvoir être encore perfectionnée.

L'application systématique des techniques dont on dispose actuellement doit permettre, dans chaque cas particulier, d'arriver à une connaissance du terrain, et de son comportement mécanique, qui, sans être aussi complète que la connaissance que l'on possède des matériaux mis en œuvre artificiellement, tels que le béton, permette au moins de savoir avec quelle marge de sécurité les roches peuvent supporter les sollicitations mécaniques auxquelles elles sont soumises. C'est en tout cas l'objectif vers lequel doivent tendre les efforts des géologues et des ingénieurs.

Le 17 avril 1960