

TRAVAUX DU COMITÉ FRANÇAIS D'HISTOIRE DE LA GÉOLOGIE (COFRHIGÉO)

TROISIÈME SÉRIE, t. XXIII, 2009, n° 9
(séance du 9 décembre 2009)

Pierre DUFFAUT

Cinquantenaire de la rupture des fondations et du barrage de Malpasset (Var)

Résumé. Pour régulariser l'alimentation en eau des communes du littoral, le département du Var s'est doté d'un barrage sur le Reyran au lieudit Malpasset, un barrage voûte construit en 1952-1954, dont le plein remplissage a été différé en raison du retard d'une expropriation. Lors de l'automne très pluvieux de 1959, l'ouvrage a été ruiné et le flot libéré a causé plus de 400 morts et des dégâts considérables dans la basse vallée et la ville de Fréjus. Comme aucun barrage voûte n'avait connu de rupture auparavant, et comme la rupture avait manifestement affecté le terrain de fondation, l'article passe en revue les études géologiques exécutées avant et surtout après la catastrophe ; il évoque l'ensemble des autres investigations et le schéma explicatif retenu à travers les travaux des commissions d'enquête, qui ont ouvert des chapitres nouveaux dans la connaissance scientifique des massifs rocheux. D'autres barrages voûtes sont cités pour les particularités de leur exploitation. L'application de la mécanique des roches au génie civil a pris corps dans le monde entier dans les années qui ont suivi.

Mots-clés : barrage – gneiss – géologie – mécanique des roches – xx^e s.

Abstract. In order to regulate the water supply for its coastal communities, the Var department equipped itself with a reservoir on the Reyran River at Malpasset site. An arch dam was built in 1952-1954, the filling up of which was delayed due to an expropriation issue. During the very rainy autumn 1959, the dam was filled up for the first time and was washed out. The flow made more than 400 casualties and huge damages along the lower valley and in the Fréjus city. As no failure of arch dams had been reported before, and as the failure obviously took place within the foundation ground, the paper reviews the geological studies made before and the more after the catastrophe; it refers to the whole other investigations, and to the explanatory scheme aroused from the works of inquiry commissions, which opened new chapters in the scientific knowledge of rock masses. Within the following years, rock mechanics began to better apply to civil engineering.

Key words: dam – gneiss – geology – rock mechanics – 20th century.

1. Introduction

Il y a cinquante ans, le 2 décembre 1959, la basse ville de Fréjus a été balayée par une vague de plus de 3 mètres de haut, venant non pas de la mer proche comme celle d'un tsunami, mais de la petite vallée du Reyran, où le barrage de Malpasset avait été emporté par la pression de l'eau de son réservoir au sein de sa fondation (Rouzet, 2009). Le grand public et les médias ont porté leur intérêt en priorité sur les 423 morts, les survivants et les dégâts ; l'anniversaire a donné lieu à quelques articles et émissions, et à une exposition à Fréjus même, où un monument a été inauguré. Le barrage lui-même, les conditions de son exploitation et de sa rupture ont été peu évoqués par les médias, alors que beaucoup d'à peu près et de contrevérités ont circulé dans la région. C'est l'occasion de revenir sur quelques points de l'histoire des barrages et celle de la « *géologie des barrages* » (Bordes, 2003). Du moins les études et travaux des commissions d'enquête et de nombreux autres acteurs ont-ils jeté les bases d'une mécanique des roches hors des mines.

2. Historique

2.1. Genèse du projet

La ville de Fréjus et l'ensemble du département du Var ont pris très tôt conscience de la nécessité de disposer de réservoirs afin d'assurer la continuité de la fourniture d'eau en saison sèche, tant pour les besoins urbains que pour l'irrigation. Déjà les Romains, créateurs de la ville, l'alimentaient par un aqueduc venant d'une source vaclusienne du haut bassin de la Siagne, et transitant par les vallées du Biançon et du Reyran. Plusieurs sites de barrages ont été envisagés sur les bassins de l'Argens, du Reyran et de la Siagne et le choix s'est porté sur le Reyran, car cette vallée, qui est relativement large dans des formations sédimentaires du Carbonifère, traverse un petit horst de gneiss (Bordet, 1951 ; Corroy, 1956) par une gorge épigénique nettement plus étroite.

Il s'agissait à l'origine d'un barrage poids en béton à l'entrée (amont) de la gorge, pour lequel des forages avaient été chargés de reconnaître l'épaisseur des alluvions en fond de vallée. Le rapport du professeur Georges Corroy établissait l'étanchéité de la retenue et considérait les flancs rocheux comme « *convenables pour l'ancrage du barrage* » : le rocher affleurerait largement en rive droite, alors que le versant rive gauche, un peu moins pentu, était couvert d'une végétation qualifiée d'impénétrable. La tranchée d'une ancienne voie ferrée¹ confirmait la nature du terrain, un gneiss très hétérogène, tantôt oëillé, tantôt schisteux, parcouru de filons de pegmatite très irréguliers.

¹ Bien qu'on ignore si la voie a été mise en service, il est certain que la plateforme a été établie dans ce but.

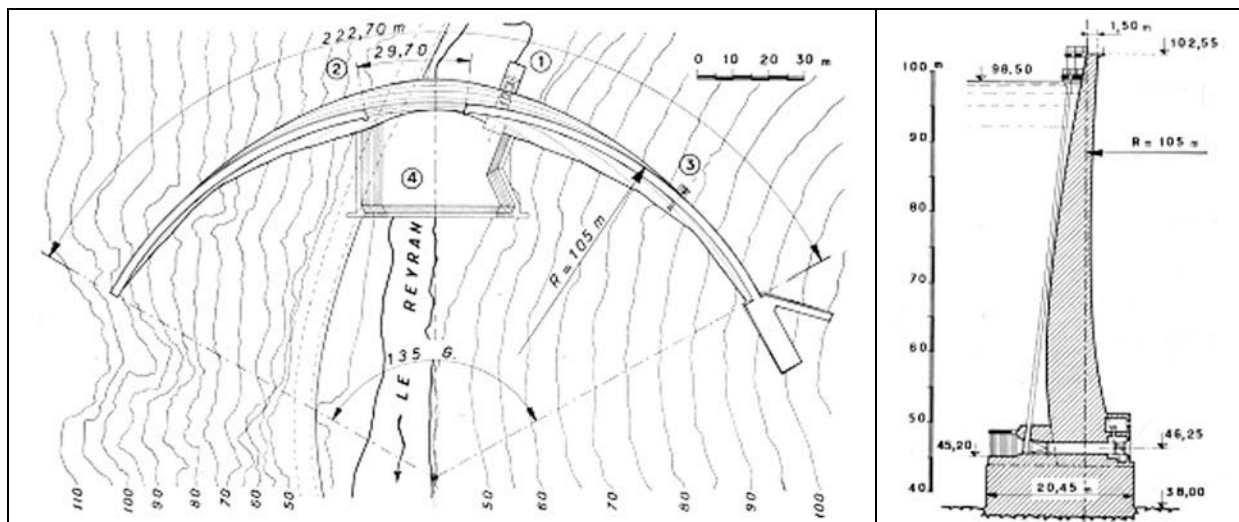


Fig. 1. Plan de la voûte et coupe verticale passant par la vanne de vidange, montrant en rive gauche la culée et le mur en aile, le seuil déversant au centre de la crête (2), le tapis de réception des déversements (4), la vanne de vidange (1), et la prise d'eau (3) (d'après Mary, 1968).

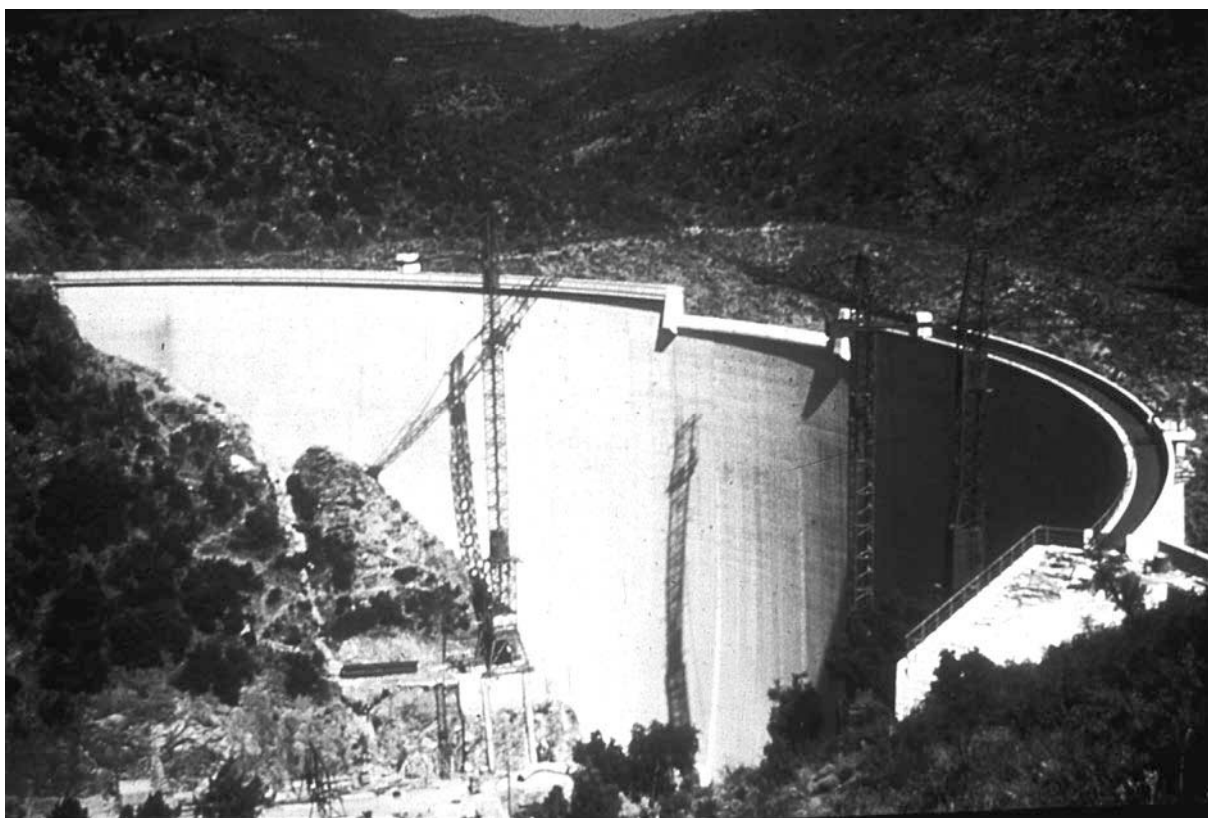


Fig. 2. Au printemps 1959, la voûte est achevée, les trois grues sont encore en place, le bassin n'est pas encore bétonné ; la culée est au premier plan, le bureau de chantier dans le coin inférieur gauche (photo COB).

Lorsque le projet a été confié à André Coyne, celui-ci a proposé de déplacer le barrage vers l'aval pour y implanter une voûte (tabl. 1), Georges Corroy l'a accepté sans reconnaissances supplémentaires : les sondages dans le lit avaient montré moins de 4 m d'alluvions, et il n'y avait pas de raison de supposer qu'il puisse y en avoir davantage à si faible distance.

Georges Corroy avait souligné que le caractère très hétérogène du terrain, passant de gneiss œillés massifs à des micaschistes écrasés, appelait des reconnaissances supplémentaires qui n'ont pas été exécutées (le crédit spécialement alloué n'a été consommé que pour un tiers). Jean Goguel supposera que le temps pressait de passer à l'exécution car le montant du crédit attribué était menacé par l'inflation monétaire, qui était alors considérable. Il est probable que les forages de l'époque n'auraient pas mis en évidence la faille que la catastrophe a révélée et, si elle avait été identifiée, son pendage vers l'amont l'aurait fait juger sans conséquence pour le barrage. Le cours de géologie de l'École centrale (cité ci-dessous en 3.1) recommandera (en 1957) de préférer aux sondages des saignées horizontales, selon une pratique alors habituelle à EDF.

2.2. Construction et mise en eau du barrage

André Coyne a conçu le barrage, en association avec le bureau d'études qu'il avait fondé, ACJB, André Coyne et Jean Bellier (Fig. 1 et 2, tabl. 1). Le marché de construction a été passé à l'entreprise Ballot frères, associée à une entreprise locale². André Coyne avait déjà conçu à l'époque de nombreux barrages, dont la première grande voûte française, Marèges sur la Dordogne, au début des années 1930, construite avec la même entreprise Ballot³. Le barrage voûte était alors reconnu depuis longtemps comme une solution sûre, économique et esthétique dans les vallées étroites à flancs rocheux⁴. On en recensait déjà plus de 50 en France, depuis Zola (mis en service en 1854 sur les plans du père de l'écrivain pour la ville d'Aix-en-Provence, bien qu'il fut mal considéré par le corps des ponts et chaussées) jusqu'à Tignes en 1952, alors le plus haut d'Europe avec 180 m, et près de 600 dans le monde. Ces nombres ont doublé

² Par le Service départemental du génie rural, pour le compte du Conseil général, maître d'ouvrage.

³ André Coyne a toujours insisté sur le rôle capital joué par l'entreprise Léon Ballot dans le succès du projet. La mécanisation du chantier et la production en masse d'un béton de qualité étaient en effet indispensables à l'édification du barrage.

⁴ Extrait du Mémoire technique rédigé le 30 mars 1933 pour le barrage de Gouessant (35) par la Société Sud-Finistère Electrique, bénéficiaire du décret de concession du 27 février 1931, construit sous le contrôle de l'ingénieur en chef des ponts et chaussées, Eugène Héлары et de l'ingénieur des ponts et chaussées, Bigot, chargé du contrôle des forces hydrauliques du département des Côtes-du-Nord. « *Nous avons arrêté notre choix à un projet de barrage à voûte unique, particulièrement approprié au cas d'espèce envisagé. En effet, la topographie de la vallée à l'endroit choisi et l'excellente qualité du rocher de fondation, qui sur les rives est presque partout à découvert et dont les sondages ont manifesté la présence à peu de profondeur dans les lits de la rivière, sont autant de circonstances favorables à la construction d'un barrage à voûte unique qui représente dans l'état actuel de la technique, la solution de beaucoup la plus économique et la plus sûre au problème posé. L'avantage de ce type d'ouvrage tient aussi bien à l'économie de cube (tant sur les fouilles que sur les maçonneries) qu'à l'économie de temps et de risques consécutive au peu d'importance des fondations en rivière* ».

depuis et surtout des barrages beaucoup plus hauts ont été construits, dont celui de Vajont dans les Dolomites (262 m) (ci-dessous 4.2).

Hauteur sur fondation	65 m	60 m sur le lit du ruisseau, cote 42 NGF
Longueur en crête	223 m	sans la culée rive gauche (ci-dessous)
Rayon amont en crête	105 m	angle au centre 135 grades
Épaisseur maximale	9 m	6,9 m au pied de la console centrale
Dimensions de la culée	longueur 22 m	largeur 6,5 m, hauteur maximale 10 m
Volume de béton	48 000 m ³	
Capacité de la retenue	55 000 000 m ³	47 hm ³ à la cote 98,5 (retenue normale)

Tableau 1. Principales données sur le barrage de Malpasset et sa retenue.

Le tableau 2 montre que, loin d'avoir été le barrage le plus mince au monde, comme il a été écrit et recopié dans certains médias, Malpasset s'insérait dans une série tout à fait classique à l'époque, série que cette rupture n'a pas interrompue. Sans évoquer le barrage expérimental du Gage, ni celui de Tolla qui ont manifesté d'importantes fissurations (ci-dessous 4.2), plusieurs voûtes étaient plus minces à la base que celle de Malpasset (Gour Noir, Luzège, la Palisse, et aussi Gage 2 construit après l'abandon de Gage 1 et donc après la catastrophe).

Nom	Mise en service	Hauteur	Épaisseurs à la base et en crête	Conçu par	Département	Remarques
Fabrèges	1947	66	12 - 2,5	COB	64	
Gour Noir	1947	44	5,4 - 1,7	SGE	15	
Le Jotty	1951	57	3 - 3	COB	74	base dans une gorge très étroite
Enchanet	1951	68	10 - 2	SGE	15	
Luzège	1951	44	5,3 - 2	COB	19	
Gage I	1954	41	2,6 - 1,3	EDF	09	abandonné après fissuration
La Palisse	1954	57	5,7 - 1,5	COB	09	
Naguilhes	1959	61	8 - 2	COB	07	
Lanoux	1960	48	6 - 2	COB	66	
Tolla	1961	90	1,8 - 1,5	COB	20	renforcé à l'aval après fissuration
Roujanel	1965	57	8,2 - 3	EDF	07	
Villefort	1965	75	9,9 - 3	EDF	07	
Gage II	1967	41	4,6 - 1,5	COB	09	
Ste Croix	1974	96	7,5 - 3	COB	04 /05	

Tableau 2. Quelques données sur des barrages français en voûtes minces contemporains de Malpasset (d'autres pourraient être cités à l'étranger) ; l'épaisseur en crête est parfois justifiée par une route, ou un déversoir de crue pour un débit important (COB est le Bureau ACJB, plus tard Coyne et Bellier ; SGE, la Société générale d'entreprises ; EDF, Électricité de France).

L'exécution des fouilles a révélé des zones où le terrain était moins résistant que prévu, conduisant à creuser plus profondément en plusieurs endroits, notamment sous la culée et sous le bassin de réception ; c'est une pratique courante sur maint chantier de barrage ; il arrive même que le projet de la structure doive être modifié lorsque des failles ou des vides karstiques sont révélés par ces creusements (par exemple, le barrage voûte de Bort est devenu poids-voûte).

Après l'achèvement de la voûte et la fermeture de la vanne, le remplissage a été retardé par un contentieux avec la mine de fluorine de Garrot, située à 5 kilomètres à l'amont, dont la retenue allait noyer les galeries et la route d'accès. Aussi le niveau de la retenue est-il resté voisin de la cote 80 NGF au lieu de 98,5 pendant l'année 1955, puis il s'est élevé un peu plus chaque année jusqu'à la cote 93 ; la pluie de novembre 1959 l'a porté à 95, puis en trois jours il est monté très rapidement jusqu'à quelques centimètres du seuil du déversoir (cote 100,40). La consigne d'ouvrir la vanne pour maintenir la « *retenue normale* » à 98,50 n'avait pas été appliquée en raison d'une phase critique des travaux de construction du pont de l'autoroute à un kilomètre à l'aval ; mais devant l'imminence du débordement, l'ordre d'ouverture a été donné le 2 décembre 1959 en fin d'après-midi ; le niveau avait à peine baissé lorsque le barrage a cédé à 21 h 10, libérant 50 millions de mètres cubes qui vont balayer la vallée et atteindre la basse ville de Fréjus et la mer en vingt minutes.

Le bilan est consternant : outre 423 morts, dont 27 non identifiés, un certain nombre de disparus et un nombre équivalent de personnes blessées et choquées, les dégâts sont considérables : un autorail a été balayé hors des rails, la voie ferrée Paris-Nice et toutes les routes traversant la vallée sont coupées, leurs ponts emportés, un millier d'immeubles sont endommagés, dont 155 complètement détruits, 3 000 hectares de terres agricoles sont dévastées, un milliers de moutons et 80 000 hectolitres de vin sont perdus, comme de nombreux camions et voitures, et jusqu'à des avions de la base aéronavale, elle-même rasée, de même que le poste météorologique.

2.3. Les commissions d'enquête (tableau 3)

Le ministre de l'Agriculture envoie sur place le chef du service des barrages au ministère des Travaux publics (Joseph Duffaut) ; dès son retour, le 5 décembre, les deux ministres nomment une commission de six ingénieurs pour déterminer les causes de la rupture (tabl. 3). Cette commission s'assure aussitôt le concours d'un géologue, Jean Goguel, ingénieur général des mines, professeur de géologie à l'École des mines et, plus tard, vice-président du Bureau de Recherches géologiques et géophysiques (BRGG). Cette commission visite le site à plusieurs reprises, la première fois dès le 20 décembre, et remet son rapport dès l'été 1960. Il est aussitôt publié dans le *Génie civil* (Collectif, 1960), mais sans les volumineuses annexes, dont l'ensemble des levers et plans d'exécution, les mesures de déformation du barrage, l'identification des principaux blocs de béton, et le rapport Goguel (2010).

Le 12 décembre 1959, le tribunal de grande instance de Draguignan nomme à son tour six experts, dans les trois domaines de la géologie, de l'hydraulique et des structures, afin de déterminer les responsabilités. Puis, devant la difficulté d'accord, tant entre eux qu'avec ceux de la commission administrative, et à la demande du Génie rural, il nomme des contre-experts le 7 mai 1962. Ces rapports sont à leur tour publiés dans le *Génie civil* (Collectif, 1966 et 1967). Les commissions se font remettre les documents disponibles, elles demandent et organisent les mesures, les prélèvements et les essais qu'elles jugent utiles, avec la collaboration de plusieurs laboratoires, dont celui de mécanique des solides de l'École polytechnique. Après un lever topographique précis, EDF a fourni une équipe entraînée aux essais de déformabilité, et a fait faire des essais sur modèle de la propagation de l'onde au Laboratoire national d'hydraulique à Chatou.

Commission administrative	MM. Gosselin, <u>Olivier-Martin</u> , Calvet, Disserens, <u>Duffaut</u> , Talureau
1er collège d'experts judiciaires	MM. <u>Casteras</u> , Escande , Gridel, <u>Haegelen</u> , Jacobson, <u>Roubault</u>
Contre-experts judiciaires	MM. <u>Barbier</u> , Biarez, Caquot , <u>Drouhin</u> , <u>Mary</u> , Pruvost

Tableau 3. Composition des commissions d'experts : les académiciens en gras, les géologues en italique, les spécialistes de barrages soulignés (Reynold Barbier n'entrera que plus tard à l'Académie des sciences).

Les commissions, et aussi d'ailleurs le tribunal, vont se heurter à une difficulté : alors que ACJB a fourni les calculs et les plans d'exécution « *théoriques* », au contraire les plans établis sur le chantier et les attachements, c'est-à-dire les documents qui font foi de l'exécution, établis contradictoirement par l'entreprise et le représentant du maître d'ouvrage, dont les dimensions des fouilles et toutes les modifications éventuelles, ont disparu, car ils étaient conservés dans un bureau de chantier balayé par le flot. En particulier les rares photos disponibles du tapis ne paraissent pas conformes au plan d'exécution originel.

Parmi les causes écartées après des examens approfondis, l'ébranlement par un séisme et l'effet des tirs d'explosifs dans les tranchées de la future autoroute ; plus tard un avocat invoquera l'altération du rocher par l'eau, ce que contredit la bonne conservation de l'aqueduc romain et la résistance des versants de la retenue à une vidange très rapide ; plus tard encore un géographe attribuera le jeu de la faille à l'activité néotectonique, parfaitement ignorée en France dans les années cinquante.

2.4. Les observations

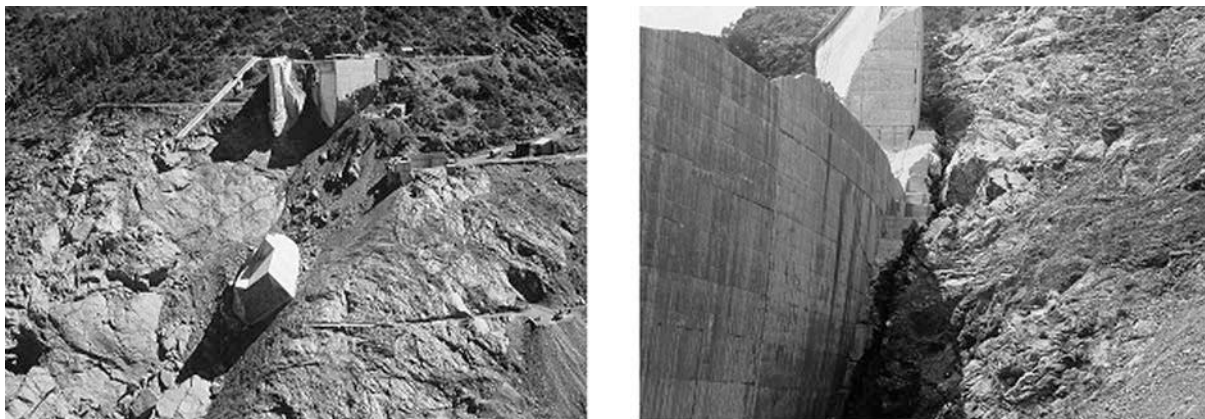


Fig. 3. Deux images clés après la rupture : à gauche, rive gauche, le dièdre excavé par le flot, avec une demi culée éboulée après ce flot, sa face aval est un plan de faille, sa face amont un ensemble de déchirures suivant la foliation ; à droite, rive droite, la crevasse ouverte sur toute la hauteur entre le béton et le rocher (photos P. Duffaut, printemps 1960).

L'observation du site montre qu'une partie de la voûte subsiste en rive droite et dans le lit du Reyran, ainsi qu'une partie de la culée et du mur en aile en haut de la rive gauche ; un grand volume de terrain a disparu sur cette rive, formant ce qu'on a appelé le dièdre (Fig. 3, gauche). Le béton restant est découpé en escaliers suivant les joints de construction verticaux et des surfaces horizontales correspondant aux levées de bétonnage. Un trait caractéristique de la rive droite (Fig. 3, droite) est une crevasse bien visible au pied amont, entre le béton et le rocher, témoignant d'un déplacement de la voûte, que le terrain n'a pas suivi. Le lever topographique confirme qu'il y a eu déplacement en bloc, augmentant depuis le haut du versant jusqu'au pied de la rive gauche, suivant une rotation autour de l'extrémité rive droite. La culée a avancé d'environ 2 mètres, deux fois plus que ce que voudrait la rotation ci-dessus.

Les observateurs n'ont pas manqué de noter que d'énormes morceaux de béton étaient rassemblés en plusieurs amas principaux, à l'amont immédiat des coudes de la vallée, qu'il n'y avait de blocs de rochers importants que dans le groupe le plus proche, et qu'une couche de rocher restait solidaire des blocs de béton identifiables comme bases de plots (Fig. 4). Cette observation atteste qu'une rupture par cisaillement a eu lieu au sein du rocher juste au-dessous de la fondation. La position dans le barrage des principaux blocs a pu être reconstituée.



Fig. 4. Les deux principaux blocs de béton, à l'amont du second coude de la vallée (larges de 13 m épais de 6 à 7 m et hauts de 8 à 10 m, ces bases des deux plots du bas de la rive gauche pèsent donc chacun plus d'un millier de tonnes) ; au premier plan, le rocher est identifié par sa couleur sombre alors que le béton est clair (photo J. Duffaut, 20 décembre 1959).

Le rocher, qui n'avait été décrit qu'assez sommairement avant la construction, est étudié en grand détail par Jean Goguel (qui note que le nettoyage par le flot a fourni des conditions d'observation nouvelles et d'une exceptionnelle facilité) : sous une apparence homogène à grande échelle, le gneiss s'avère plus hétérogène à l'échelle métrique : ici gneiss œillé massif, ailleurs roche très micacée, parfois qualifiée de micaschiste, où il est aisé de mesurer une foliation et une linéation (celle-là pivotant autour de celle-ci) ; partout il est injecté de filons et d'amas de pegmatite très irréguliers ; il est parcouru de diaclases très serrées dont la direction échappe à toute statistique, et de véritables failles dont il est difficile d'apprécier le rejet (très grossièrement le rejet est métrique, l'espacement décamétrique). Enfin, la zone proche du dièdre (en rive gauche) paraît caractérisée par la présence de séricite, susceptible d'augmenter la déformabilité de la roche.

La faille qui forme la face aval du dièdre (plane, à de légères ondulations près) a une direction perpendiculaire à la vallée, et un pendage voisin de 40° vers le nord, l'amont ; elle passe donc sous la fondation du barrage à une quinzaine de mètres de profondeur, et sous la partie aval du tapis de réception des déversements. Sa tranche était visible au fond du dièdre (Fig. 5, gauche), une épaisseur métrique de roche écrasée à l'allure de brèche à éléments

arrondis ; et elle est toujours bien visible au pied de la rive droite avec une apparence plus proche d'un *kink band*⁵ que d'une brèche (Fig. 5, droite).



Fig. 5. Deux gros plans sur la faille principale, à droite, au pied du dièdre, à gauche au pied de la rive droite ; les bordures de roche finement broyée, bien visibles à gauche, ont été érodées à droite (épaisseur environ métrique dans chaque cas) (photos P. Duffaut, 1960).

2.4. Mesures, essais et calculs

Le béton : la qualité du béton du barrage, qui était régulièrement contrôlée par le laboratoire de l'arsenal de Toulon, a été mise hors de cause rapidement (les agrégats⁶ provenaient d'une carrière de rhyolite à peu de distance en aval).

Le terrain : Une étude par sismique réfraction a mis en évidence une zone superficielle décomprimée d'épaisseur dix à vingt mètres. Une galerie principale en rive gauche et trois excavations plus modestes ont accueilli les mesures de déformabilité du rocher exécutées par une équipe spécialisée d'EDF ; la même équipe répètera les essais pendant le reste de l'année sur sept autres sites de barrages alors en chantier, afin de permettre une comparaison. Ce type de mesure, mis au point pour étudier le rocher des conduites forcées souterraines (Talobre, 1957), n'avait été utilisé que dans des cas très particuliers sur des fondations de barrages. Les résultats en sont contestables dans l'absolu en raison de la faible surface sollicitée, mais le classement relatif est néanmoins éloquent : le terrain de Malpasset arrive bon dernier, non seulement des sites de barrages voûtes, mais tous types confondus ; ce qui sera confirmé par

⁵ Mode de déformation de roches finement feuilletées, qui substitue au plissement de couches continues la juxtaposition de bandes où foliation et schistosité forment des angles vifs.

⁶ La normalisation française a remplacé depuis le mot agrégat par granulats (en dépit de l'usage anglais *aggregate*).

les mesures exécutées au cours des années suivantes, tant sur des sites d'EDF que sur des projets de COB⁷.

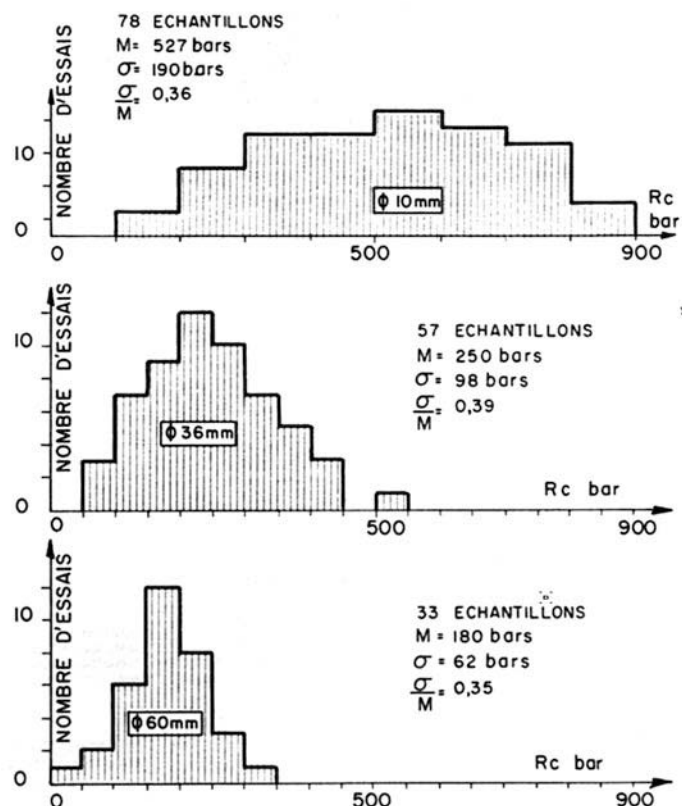


Fig. 6. Dispersion des résultats de résistance à la compression R_c sur des éprouvettes de diamètre 60 mm en bas, 35 mm au milieu, et 10 mm en haut, mettant en évidence l'effet d'échelle : M désignant la valeur moyenne et σ l'écart-type, le rapport σ/M caractérise la dispersion qui n'est pas significativement affectée par le diamètre (Bernaix, 1967).

La roche : Les échantillons prélevés ont été soumis à tout ce qu'on savait faire comme essais mécaniques, notamment au laboratoire de mécanique des solides de l'École polytechnique, dont les résultats ont été détaillés dans la thèse de Jean Bernaix (1967), sous la direction de Jean Mandel et Pierre Habib. La dispersion de ces résultats et l'effet d'échelle considérable qui ont été mis en évidence de façon claire, caractérisent une roche intensément fissurée à toute échelle (Fig. 6). L'éventualité d'un fluage, envisagée par comparaison à des études en cours sur d'autres roches, a été écartée. À ce point, rien ne paraissait franchement anormal, la résistance moyenne de 36,5 MPa⁸ étant du même ordre que celle du béton (bien que l'extrapolation à l'échelle de la cicatrice au flanc de la vallée soit hors d'atteinte). C'est la mesure de la perméabilité qui allait apporter un résultat inattendu, jamais identifié auparavant (Habib, 2010) : en raison de la très faible perméabilité, il n'était pas possible de se contenter d'essais en percolation longitudinale sur des carottes ou tranches de carottes, en raison de

⁷ Le Bureau d'études ACJB, fondé par André Coyne, est devenu Coyne et Bellier, Bureau d'ingénieurs conseils (COB) ; il s'est intégré en 2009 à Tractebel Engineering, du groupe GDF-Suez.

⁸ Mégapascal, un million de Pascals, soit environ 10 bars ou 10 kg/cm².

l'incertitude sur l'étanchéité latérale des échantillons ; la perforation d'un trou axial borgne a permis un essai de percolation radiale beaucoup plus satisfaisant (Fig. 7).



Fig. 7. Schéma des essais de perméabilité, à gauche par percolation longitudinale, la carotte étant isolée de la pression du fluide environnant par une gaine étanche, à droite par percolation radiale (dont le sens peut être inversé, convergent ou divergent) (Habib, 2010).

Il est apparu que la perméabilité (déjà faible), était encore diminuée par la pression extérieure, qui agissait en refermant les fissures, et en revanche elle augmentait lorsque la pression intérieure était la plus forte. Le même essai ayant été appliqué à d'autres roches et matériaux, on a constaté que cette sensibilité à la contrainte était à Malpasset beaucoup plus importante qu'ailleurs : le rapport des perméabilités entre les pressions -1 et 50 bars était égal à un pour un métal fritté et certains calcaires compacts, il restait inférieur à 10 ou 20 pour toutes les roches essayées, mais pouvait dépasser 100 pour les échantillons de Malpasset. Cela montre que le poids du barrage et le transfert de la poussée qu'il reçoit du réservoir étaient susceptibles de diminuer très sensiblement la perméabilité du terrain de fondation, et de créer au sein de celui-ci une barrière encore plus étanche sur laquelle devait se concentrer la poussée des écoulements souterrains. Une autre thèse également commanditée par COB au laboratoire de mécanique des solides (Maury, 1970), ainsi que des essais sur modèles physiques exécutés chez COB, ont conduit à accorder plus d'importance à cette action en montrant que certaines structures des massifs rocheux pouvaient « canaliser » les contraintes en profondeur plus étroitement et plus profondément que le schéma classique en milieu homogène.

La sécheresse de 1962 ayant asséché les profondes mares qui subsistaient au pied du barrage, les contre-experts ont pu faire dégager la partie inférieure de la crevasse rive droite, et faire creuser une petite galerie sous le béton ; la crevasse se poursuivait au sein du rocher, le long d'une zone broyée par cisaillement. C'est par cette crevasse qu'il est passé de l'eau pendant plusieurs jours après la rupture (Fig. 8).

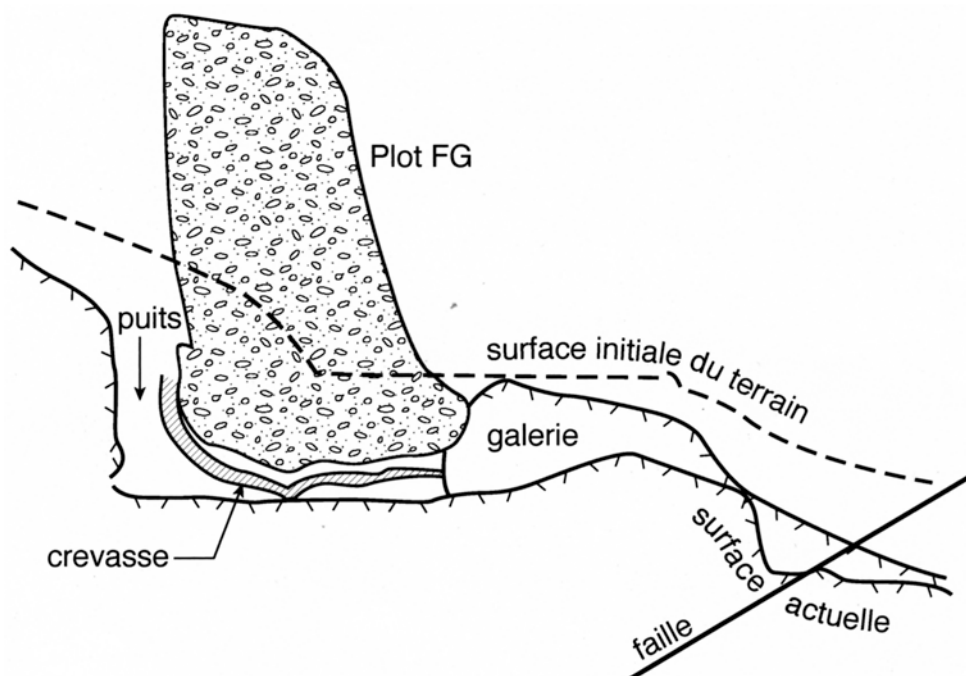


Fig. 8. Coupe radiale sous le béton au pied de la rive droite, le long de la galerie ouverte en 1962, montrant la position de la crevasse ouverte au sein du rocher (adapté d'après Post et Bonazzi *in* Leonards, 1987).

L'auscultation⁹ du barrage était assurée par la mesure géodésique du déplacement de nombreux repères placés sur le parement aval (triangulation à partir de piliers fixes sur les versants). Prévue chaque année, cette mesure n'avait pas été effectuée en 1954 avant le remplissage, malgré l'insistance de l'ingénieur-conseil, ni en 1957 (faute semble-t-il de crédits) ; on ignore donc les déformations dues au remplissage des premiers 40 m ; quant aux mesures de juillet 1959, leurs résultats ne sont communiqués au maître d'ouvrage qu'en novembre, et ils n'ont pas alors attiré l'attention des responsables. D'ailleurs qui surveille quoi ? Le maître d'ouvrage fait suivre les mesures au préfet et personne n'est en état de les interpréter. Pourtant une étude attentive, mais postérieure à la rupture, peut déceler une légère tendance des déplacements à tourner vers la rive gauche (la valeur absolue du plus fort déplacement, 17 mm vers l'aval au point de mesure le plus bas, n'étant pas en soi un critère d'alarme). À partir de la cote 94, atteinte en juillet, 6 m d'eau supplémentaires représentent un accroissement de poussée sur le barrage très significatif, d'au moins 20 %, mais on ignore la progression des déplacements au cours des quatre derniers mois.

En vérité, ce barrage était pratiquement à l'abandon, il n'avait jamais été « essayé », jamais rempli, et aucun personnel compétent n'était chargé de sa surveillance ; des fissures apparues courant novembre sur le béton du tapis au pied de la rive droite n'avaient pas été

⁹ À EDF, l'auscultation désigne l'ensemble des mesures exécutées périodiquement pour la surveillance du comportement des structures (déplacements d'où déformations, d'où contraintes ; fuites, résistivité, etc.).

relevées, ni photographiées ; une arrivée d'eau assez haut en rive droite a pu être attribuée aux pluies tombées plus haut sur le versant ; ces observations restées vagues n'ont pas été répercutées à l'ingénieur conseil qui n'avait conservé aucune mission de suivi après la réception dite définitive (prononcée en dépit d'un remplissage incomplet). L'inquiétude devant la crue avait tout de même conduit le propriétaire à convoquer l'ingénieur conseil, mais trop tard.

Les calculs : L'application au calcul de la voûte des méthodes apparues entre-temps, considérablement perfectionnées grâce aux progrès des ordinateurs, a confirmé la validité des calculs d'origine exécutés « à la main ». Quant à l'influence des fondations, elle n'était prise en compte que par des hypothèses sur le rapport des modules de déformation du béton et du rocher (pris ici de 10 à 1).

2.5. Le procès

Les audiences du procès se sont déroulées du 21 au 30 octobre 1964 au tribunal de grande instance de Draguignan. Après le décès d'André Coyne, l'ingénieur en chef du Génie rural du Gard et le directeur de la société chargée des mesures géodésiques étaient les seuls prévenus. L'insuffisance de l'étude géologique préliminaire de Georges Corroy a été stigmatisée par Marcel Roubault. Mais dix ans s'étaient écoulés de l'étude au procès et les pratiques avaient fait des progrès dans l'intervalle ; en vérité plusieurs barrages voûtes avaient été construits pour EDF avec des reconnaissances aussi sommaires. Seul Marcel Roubault a refusé de participer aux jugements unanimes des témoins et des experts sur la personnalité d'André Coyne. En revanche, Georges Corroy s'est montré subjugué, lui attribuant « *une âme de géologue, connaissant admirablement la roche* » (il était allé avec lui à Bimont¹⁰ où une faille très importante avait été traitée par injections). Il a déclaré à l'audience qu'il aurait consulté Lugeon¹¹ s'il avait eu le moindre doute sur le site de Malpasset. La mécanique des roches a été présentée au tribunal par Joseph Talobre, l'auteur d'un premier traité paru en 1957. Mais seul Jean Biarez a tenu un langage scientifiquement correct sur les sous-pressions.

Après une ultime confrontation des 18 experts, le 24 octobre 1964, 14 contre 4 se sont prononcés pour l'imprévisibilité et les deux accusés ont été relaxés¹². Dans une lettre au journal *Le Monde* (publiée le 13 mars 1965) Jean Goguel souligne « *un enchaînement complexe d'erreurs d'appréciation* », il incrimine « *l'histoire administrative du projet* » et regrette qu'on n'ait pas recherché « *les facteurs qui ont induit en erreur* » André Coyne. Trois ans plus tard, huit ans après la catastrophe, la cour de cassation a conclu qu'aucune faute humaine ne pouvait être

¹⁰ Le barrage de Bimont est un barrage voûte conçu par André Coyne pour le Génie rural du département voisin des Bouches-du-Rhône, haut de 87 mètres, mis en service en 1952 ; aucun contact entre les deux administrations voisines n'a été rapporté dans le dossier de Malpasset.

¹¹ Voir ci-dessous 3.1.

¹² Les parties civiles, à la recherche de coupables, ont obtenu un deuxième procès en 1965, dont tous les prévenus ont été relaxés.

retenue contre quiconque, aucune infraction aux règles de l'art, aucun vice dans la conception, ni dans la façon dont les travaux furent exécutés.

3. Conséquences pour l'étude et l'exploitation des barrages

3.1. Retour sur les reconnaissances géologiques en matière de barrages

On a du mal à imaginer le manque de littérature à l'époque sur les reconnaissances du terrain de fondation des barrages, dès lors qu'il s'agissait de fondations rocheuses. Le grand géologue suisse Maurice Lugeon avait rassemblé son expérience dans une conférence aussitôt publiée (1933) : le problème fondamental était l'étanchéité de la cuvette de retenue, puisqu'elle était destinée à conserver l'eau. Les calcaires karstifiés et les anciens lits comblés étaient les deux craintes majeures. « *Ce que l'ingénieur barragiste attendait du géologue, c'était une appréciation de la capacité de la fondation à résister à un ensemble de forces bien déterminées le long de la surface d'appui (et le géologue le renseignait d'ailleurs plutôt sur l'étanchéité des terrains...)* » (Carrère, 2010).

Quant au rocher sous le futur barrage, il s'agissait d'une part de connaître sa profondeur sous les alluvions du lit du cours d'eau, afin de parer aux surprises de surcreusements (déjà éprouvées en France à Serre-Ponçon sur la Durance et au Chambon, sur la Romanche), et d'autre part d'apprécier les altérations superficielles, afin d'évaluer le volume de terrain à enlever pour appuyer le barrage « *sur le roc* ». Les cahiers des charges faisaient à peine mieux que les codes de l'Antiquité en invoquant « *le son clair du marteau de l'agent voyer* ». Aux États-Unis, le Berkeley volume de l'*American Geological Society* (Paige, 1950), qui contient un chapitre de 34 pages intitulé *Geology and Dam construction* (Burwell and Moneymaker, 1950), n'avait probablement pas atteint les ingénieurs français. Il procédait d'ailleurs par description de cas vécus comme un peu plus tard en France l'ouvrage de Maurice Gignoux et Reynold Barbier (1955).

L'établissement public Électricité de France s'est doté, dès son origine en 1946, de deux ingénieurs spécialisés, Jean Crosnier-Leconte en géologie, et Joseph Talobre dans ce qu'il a baptisé lui-même la mécanique des roches. Dans son cours de géologie à l'École centrale, en 1957, le premier écrit : « *Pour la recherche des emplacements de barrages, il est préférable d'effectuer, avant les sondages, de larges saignées horizontales dans les terrains de couverture de façon à mettre la roche en place à nu sur une certaine longueur. On fait ainsi apparaître les variations de nature de la roche, les diaclases, les failles, les zones d'altération, etc...., et on peut en mesurer les directions. Ces premières observations permettent d'implanter les sondages exactement et d'interpréter les carottes ensuite. Cette observation est particulièrement importante dans les terrains cristallins, où les variations sont telles qu'il est souvent assez difficile de raccorder les résultats des sondages entre eux* ». La pertinence de ce paragraphe pour le site de Malpasset est claire, mais il arrive après la construction ; en outre

l'importance pratique des altérations et des failles dans les roches ignées n'apparaît guère ailleurs dans ce cours, ni dans la conférence du même auteur à Liège en 1959. Quant à Joseph Talobre, ses travaux vont porter d'abord sur les ouvrages souterrains : sa méthode, déjà citée, était employée pour calculer les conduites en puits blindés, plus économes en acier que les conduites posées sur les versants. EDF appliquera désormais cette méthode sur tous les chantiers de barrages, sans jamais retrouver de résultats aussi faibles qu'à Malpasset.

Parmi les membres des trois commissions, la plupart ont considéré le rocher qu'ils ont pu voir sur place comme suffisamment résistant pour la fondation du barrage (mais aucun n'a pu connaître précisément le terrain du dièdre, qui n'a évidemment donné lieu à aucun essai). Le rapport Goguel précise d'ailleurs : « *Les rochers qui affleurent en haut des pentes, tant sur la rive droite que sur la rive gauche, 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* ».

3.2. La prise de conscience de l'importance de la mécanique des roches

La première édition du livre de Joseph Talobre intitulé *La Mécanique des Roches* date de 1957 et les essais mécaniques décrits dans ce livre étaient loin d'être systématiques (la deuxième, en 1966, tiendra compte de Malpasset, et peu après sa retraite, Joseph Talobre participera aux études d'un grand barrage voûte en Iran). Dérivé de l'essai à la plaque en mécanique des sols, l'essai « *au vérin* » nécessite un effort plus grand, donc une réaction recherchée sur la face opposée d'une excavation, galerie ou puits. On en connaissait des applications déjà anciennes à des barrages sur des roches sédimentaires tendres en Algérie et en Suisse, et au contraire sur des roches très dures comme les quartzites du barrage de Tignes (Habib, 1950).

Une des distinctions fondamentales de la mécanique des roches est entre la **roche**, à l'échelle de l'échantillon prélevé entre discontinuités macroscopiques, étudié au laboratoire, et le **massif rocheux**, terrain en place (ou *in situ*) associant à la roche l'ensemble des discontinuités qu'on peut y reconnaître (la distinction entre *Gestein* et *Gebirge*, venant d'auteurs autrichiens, a été adoptée dès les débuts du Comité français de Mécanique des Roches, ainsi que le mot **joint** pour toutes les surfaces de discontinuité). Les propriétés hydrauliques et mécaniques du massif rocheux sont profondément modifiées par l'existence de joints, d'autant plus lorsqu'il y a un fluide dans les joints (Comité français de Mécanique des Roches, 2004).

3.3. L'eau dans le massif rocheux et les sous-pressions

En effet, il y toujours, ou presque toujours, de l'eau. Indépendamment d'actions physico-chimiques (qui souvent ne se manifestent qu'à long terme), la pression ou la succion jouent un rôle essentiel sur l'équilibre des terrains. Le concept de sous-pression a été clairement formulé par Maurice Lévy (1895) après la rupture du barrage de Bouzey : si peu qu'il passe d'eau sous

le corps d'un barrage en maçonnerie, la pression de cette eau, qui diminue de l'amont à l'aval, se retranche du poids du barrage : c'est tout simplement une application du principe d'Archimède. Pour assurer l'équilibre du barrage, il faut lui donner un poids supplémentaire, ou confier à un système de drainage soigneusement entretenu le soin de « *rabattre* » la pression de l'eau. Dans le cas d'un barrage voûte, la surface de béton au contact du terrain est réduite, donc la sous-pression est minime. Sous-pression et drainage étaient donc négligés, sans penser qu'au cœur même du béton, comme au-dessous du contact béton-rocher et à l'aval sur une certaine distance, de l'eau s'écoule aussi, et exerce une pression.

Le concept de pression interstitielle, introduit en mécanique des sols par Terzaghi, avait à peine pénétré le milieu des ingénieurs français dans les années 1960 et les discussions ont été vives pour savoir comment l'appliquer dans les roches (Bordes, 1999 ; Carrère, 2010). Les expressions employées par les ingénieurs de l'époque, y compris les hydrauliciens, étaient encore très maladroitement (il y aurait un florilège à composer avec les dépositions au procès, par exemple « *les infiltrations minuscules qui ne trouvent pas leur exutoire* »). Seul Jean Biarez, le plus jeune des experts, maîtrisait pleinement ce concept (il a précisé d'ailleurs qu'il ne l'avait acquis qu'après sa formation initiale et qu'il a dû l'assimiler afin de l'enseigner à ses élèves). Les travaux de thèse de Claude Louis (1968) l'ont étendu aux massifs rocheux.

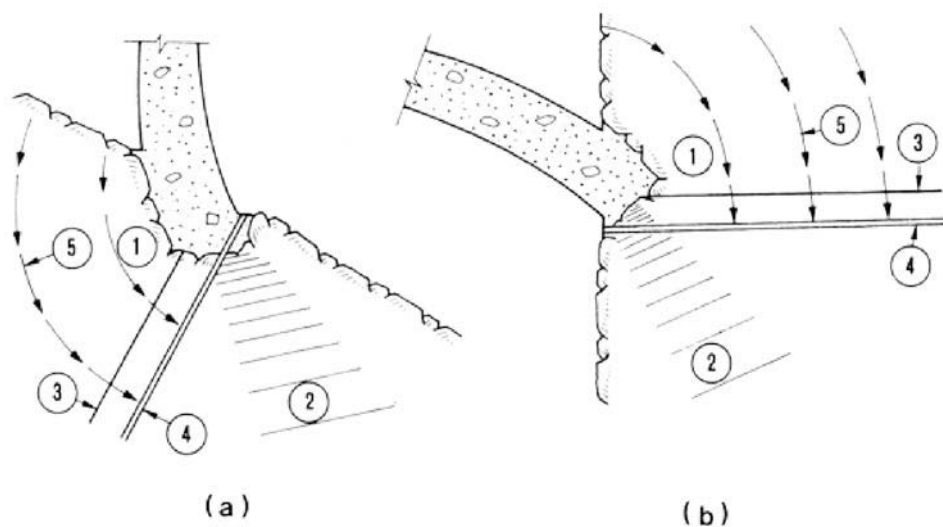


Fig. 9. Positions respectives recommandées du voile de drainage 4 et du voile d'injection 3, d'après Londe 1993, (a) en élévation et (b) en plan (1 désigne la zone en extension à l'amont immédiat de la fondation, 5 les lignes de courant de l'écoulement autour du barrage).

Dès le lendemain de la rupture de Malpasset, les réflexions menées par Pierre Londe et Francis Sabarly (1966) ont conduit à appliquer aux barrages voûtes la pratique du drainage sous forme d'un « *voile* » suivant de près le « *voile* » d'étanchéité classique dont la position est fortement repoussée vers l'amont (Fig. 9). De nombreuses thèses ont été lancées notamment à l'initiative de Coyne et Bellier sous la direction de Pierre Habib et Pierre Londe (Bernaix, 1967,

Maury, 1970, Schneider 1967), et la Délégation générale à la recherche scientifique soutint une étude sur les roches françaises les plus caractéristiques (Collectif, 1969).

Un livre de Marcel Mary (1968) va faire le point sur les accidents de voûtes, puis, en 1982, le professeur Leonards (1987) organise à l'université Purdue (à Lafayette, Indiana), un colloque consacré à quatre catastrophes de barrages : Malpasset en 1959, Vajont et Baldwin Hills en 1963 et Teton en 1976 (les deux derniers étant des barrages en remblai, l'un proche de Los Angeles, en Californie, l'autre sur la Teton river, affluent de la Snake river, en Idaho). Plusieurs experts internationaux en mécanique des roches et barrages y participent, dont Pierre Londe pour la France, Laginha Serafim pour le Portugal et Walter Wittke pour l'Allemagne, et la discussion sur Malpasset confirmera la thèse déjà résumée par Mary (Fig. 10), malgré quelques hésitations nées des modèles les plus récents. Divers chercheurs publient encore des études sur ce cas exceptionnel, et Carrère (2010) montre comment les projets de grands barrages au bureau d'études Coyne et Bellier ont bénéficié de l'ensemble des enseignements et réflexions qui ont suivi la rupture de Malpasset.

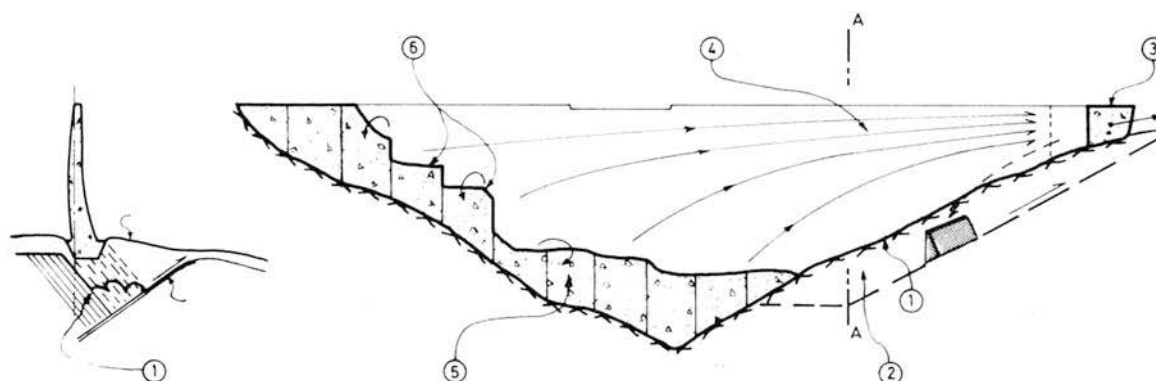


Fig. 10. Mécanisme de la rupture du barrage de Malpasset selon l'interprétation de Mary. À gauche coupe à mi-hauteur de la rive gauche : la poussée de l'eau étanche le terrain et ouvre la foliation, l'eau pénètre la crevasse (1) ; à droite le dièdre ayant commencé à glisser vers l'aval et vers le haut (2), la coque reporte sa poussée vers la culée (3), qui cède (4) ; l'arc inférieur fléchit horizontalement (5) ; privés d'appui en rive gauche, les plots rive droite fléchissent verticalement (6) et la coque explose (Serafim, in Leonards, 1987).

4. Les modifications de barrages en début d'exploitation

4.1. Aurait-on pu éviter la catastrophe ?

Aucun barrage voûte n'avait subi de rupture totale avant 1959, aucune rupture n'a eu lieu depuis, alors que des barrages beaucoup plus hauts ont été construits et exploités avec succès ; au contraire, la voûte italienne de Vajont, record mondial de hauteur avec 262 m, a donné l'exemple d'une résistance exceptionnelle à une surélévation qu'aucun autre type de barrage n'aurait supportée (ci-dessous). Ce bilan n'est pas allé sans quelques ratés, mais la

surveillance a permis de déceler le danger en temps utile et d'apporter des mesures pour l'éliminer (mesures de saine gestion qui ne sont évidemment pas réservées aux barrages voûtes).

Deux exemples français ont été exposés dans Mary (1968) : EDF avait construit à titre expérimental une petite voûte très mince sur un petit affluent de la Loire, le Gage (sur le haut plateau ardéchois), et un peu plus tard, en Corse, la voûte beaucoup plus haute de Tolla, sur le Prunelli ; les fissures apparues sur ces coques ont conduit au remplacement complet de la première (par Gage II, cf. tableau 2 ci-dessus) et à un renforcement très lourd de la seconde. Deux autres petites voûtes dont le comportement n'était pas satisfaisant (la Bromme, Cantal, et Piney, Loire) ont été abandonnées après des décennies de service.

Le remplissage complet du grand barrage mixte de Roselend (Savoie), n'a été autorisé qu'après addition d'une « *plinthe* » au pied amont du mur à contreforts appuyé sur une voûte tronquée (Wong et Daubord, 1986). Quant au barrage de Bort-les-Orgues, sur la Dordogne (Corrèze), non seulement le projet initial de voûte avait dû être changé en poids-voûte après la découverte, lors de l'excavation des fouilles en 1946, d'une zone faillée dans l'appui rive gauche, mais quarante ans plus tard, une plinthe lui a été ajoutée, ainsi que des injections, pour traiter des sous-pressions et des fuites qui auraient pu devenir dangereuses (Chambon, 1986, Combelles, 1986). À l'étranger aussi, il y a des exemples (tabl. 4) : limitation du remplissage (barrages de Beauregard, en Italie, et d'El Atazar en Espagne) ; ou bien renforcements considérables, soit dès le « *jeune âge* » (la grande voûte de Kölnbrein a été dotée d'un renfort massif en pied de 66 000 m³, Fig. 11), soit après quelques décennies (le pied aval des ailes de la voûte des Toules est en cours de renforcement). La réparation par injections de la voûte de Zeuzier est un cas particulièrement remarquable ; elle s'était fissurée en raison de l'affaissement du terrain de fondation provoqué par une galerie creusée 400 m plus bas (Lombardi, 1986).

Nom	Pays, région	Cours d'eau	Hauteur	Année	Remarques
Beauregard	Italie, Val d'Aoste	Doire de Valgrisanche	132	1954	exploité à - 70 m
El Atazar	Espagne, Madrid	Rio Lozoya	134	1972	exploité à - 15 m
Kölnbrein	Autriche, Carinthie	Malta	200	1978	renfort au pied
Les Toules	Suisse, Valais	Dranse d'Entremont	86	1963	renfort des ailes
Zeuzier	Suisse, Valais	Lienne	156	1957	injection de fissures
Vajont	Italie, Frioul-Vénétie	Vajont/Piave	262	1963	glissement terrain

Tableau 4. Quelques données sur les barrages étrangers cités.

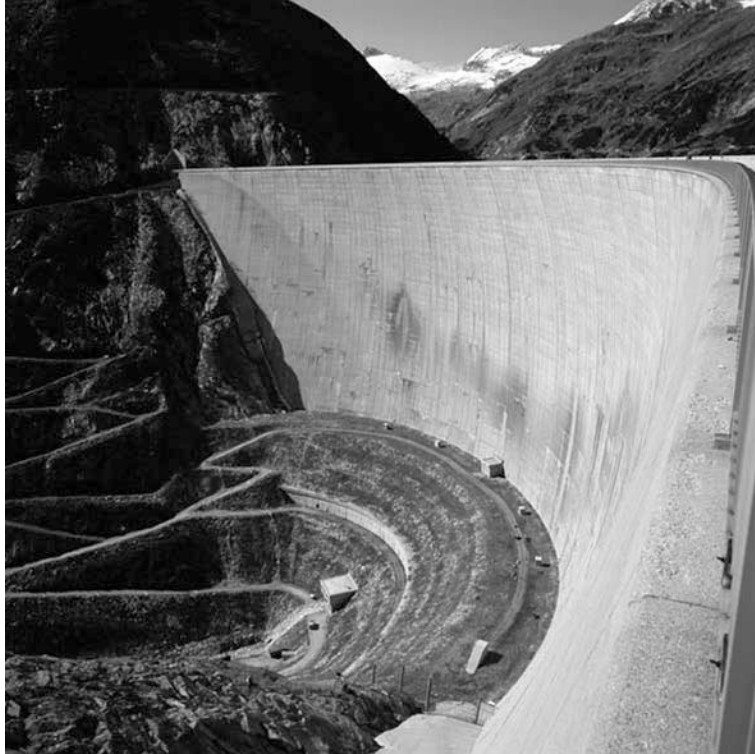


Fig. 11. Le barrage de Kölnbrein, au pied duquel la végétation cache le massif de renfort (66 000 m³ de béton) clavé contre la voûte par des vérins (photo Malta Kraftwerk).

La catastrophe du barrage-réservoir de Vajont, survenue le 9 septembre 1963, apporte au contraire un argument puissant sur la capacité de résistance des voûtes : construit dans le massif italien des Dolomites de 1952 à 1959, il barre sur 262 m de hauteur un cañon très étroit par lequel le torrent Vajont rejoint la vallée du fleuve Piave. Au cours du remplissage du réservoir, l'ensemble du replat rive gauche a présenté des mouvements importants, étendus ensuite au flanc du mont Toc où une large crevasse en forme de M est apparue. En dépit de la surveillance, une masse rocheuse de 270 millions de mètres cubes a soudainement accéléré jusqu'à 60 km/h, refoulant l'eau du réservoir : l'eau a déferlé contre le barrage et l'a surmonté d'une centaine de mètres, débordant ensuite plusieurs heures sur une vingtaine de mètres d'épaisseur. Si le flot a causé dans la vallée du Piave deux milliers de morts et des dégâts considérables, le barrage a résisté au choc, au déversement, et à la poussée supplémentaire de la masse glissée (Fig. 12). Aucun autre type de barrage qu'une voûte n'aurait supporté pareille épreuve.



Fig. 12. Le barrage de Vajont vu d'amont : le terrain glissé ne laisse voir que la partie supérieure, la route de crête a été emportée ; la trace de la vague en rive gauche est rendue visible par l'absence de végétation sur 100 m plus haut (photo de l'auteur, mai 2003).

4.2. Évolution de la réglementation

L'insuffisance des dispositions réglementaires étant clairement apparue, l'État a mis en place par un décret du 13 juin 1966 un organisme chargé d'intervenir quel que soit le ministère de tutelle. Ce « *Comité technique permanent des barrages* » (étendu depuis peu aux autres ouvrages hydrauliques considérés comme dangereux) est composé de huit membres : deux nommés par chacun des trois ministres intéressés et deux experts indépendants nommés d'un commun accord par ces ministres (l'un d'eux étant un géologue). Il est saisi (ou se saisit lui-même) de tout projet de barrage, en suit la construction, puis l'exploitation. Afin de hiérarchiser son action, les barrages français sont désormais classés en quatre catégories suivant leur hauteur H et le volume V du réservoir¹³ et une check-list spécifique est définie pour chacune¹⁴. L'étude géologique des fondations y est tout particulièrement soulignée. L'ensemble des mesures a été remis à jour et unifié dans le cadre de la loi sur l'eau (30 décembre 2006) et complété par les arrêtés du 29 février et du 12 juin 2008.

¹³ Le critère k fait intervenir le produit du carré de H par la racine carrée de V : $k = H^2 \cdot \sqrt{V}$.

¹⁴ Il y a environ 300 barrages de classe A, hauts de plus de 20 m ; 300 de classe B et environ 500 de classe C. Quant aux barrages de classe D, de moins de 2 m, il en existe plusieurs dizaines de milliers.

5. Conclusions

Le nombre de ruptures de grands barrages dans le monde est de l'ordre de 4 à 5 par an (sur une population d'environ 50 000) ; il s'agit en grande majorité de digues et barrages en remblais ; la proportion était autrefois plus élevée ; elle est sensiblement plus faible pour les ouvrages les plus importants, mieux étudiés et mieux surveillés. Une seule rupture totale de barrage voûte est survenue. Les voûtes sont les barrages les plus économiques, pourvu que le terrain s'y prête par sa morphologie et sa résistance ; ils sont les plus esthétiques, et surtout ils sont de très loin les plus sûrs. La résistance des voûtes est attestée par le fait bien connu que les ponts romains en arc, dès lors que les crues et les guerres les ont épargnés, sont les seuls capables de supporter les convois exceptionnels des cuves de réacteurs nucléaires alors qu'ils étaient construits pour des charrettes ! On pourrait soutenir que la voûte de Malpasset, de ce point de vue, est l'exception qui confirme la règle.

Le piège géologique était difficile à identifier, l'influence extraordinaire de la contrainte sur la perméabilité était insoupçonnée, la faiblesse du module aussi (le gneiss dans l'Estérel n'est pas le gneiss du Massif central), les sous-pressions étaient négligées, la surveillance du barrage et la compétence des responsables étaient clairement insuffisantes. Heureusement, la situation administrative a été corrigée ; les études géologiques ont fait des progrès, de même que les moyens de forage, les méthodes géophysiques, les calculs de structures, les moyens de surveillance, et surtout la connaissance des massifs rocheux. Dans sa déposition au procès en 1964, un directeur d'EDF, D. Olivier-Martin a pu dire : « *la mécanique des roches est une science dans l'enfance, je serais même tenté de dire que c'est la catastrophe de Malpasset qui lui a donné naissance* ».

Références

- BELLIER, J. (1967). Le barrage de Malpasset. *Travaux*, n° 389 (juillet 1967), p. 3-63.
- BERNAIX, J. (1967). *Étude géotechnique de la roche de Malpasset*. Dunod, Paris, 215 p.
- BORDES, J.-L. (1999). Aperçu historique sur la notion de la pression de l'eau dans les sols et les milieux fissurés en France, du XVIII^e au XX^e siècle. *Revue française de Géotechnique*, **87**, juin, p. 3-15.
- BORDES, J.-L. (2003). Histoire des débuts de la géologie appliquée aux barrages en France. *Revue française de Géotechnique*, **105**, 4^e trimestre, p. 77-87.
- BORDET, P. (1951). Étude géologique et pétrographique de l'Estérel. *Mémoires pour servir à l'Explication de la Carte géologique détaillée de la France*, 207 p.
- BURWELL, E. B., MONEYSMAKER, B. C. (1950). Geology and dam construction. In PAIGE, S. (Ed.), *Application of Geology in Engineering Practice*, Berkeley Volume. Geological Society of America, p. 11-44.

- CARRÈRE, A. (2010). Les leçons de Malpasset, leur application aux projets d'aujourd'hui. *Revue française de Géotechnique*, n° 131-132, p. 37-52.
- CHAMBON, J. (1986). Barrage de Bort-les-Orgues, tapis d'étanchéité amont rive droite. *Travaux*, fév. 1986, p. 47-48.
- COLLECTIF (1960). Rapport de la commission d'enquête sur la rupture du barrage de Malpasset, près de Fréjus. *Génie civil*, **137**, p. 255-257.
- COLLECTIF (1965). Malpasset, Rapport de la commission judiciaire d'expertise. *Génie civil*, **147**, p. 239-246 et 277-283.
- COLLECTIF (1966). Malpasset, Rapport de la commission judiciaire de contre-expertise. *Génie civil*, **148**, p. 14-20 ; p. 99-108.
- COLLECTIF (1969). *Catalogue des caractéristiques géologiques et mécaniques de quelques roches françaises*. Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris, 140 p.
- COMBELLES, J. (1986). Utilisation de tapis amont pour la lutte contre la fissuration des fondations de barrages. *Travaux*, fév. p. 45-46.
- COMITE FRANÇAIS DE MECANIQUE DES ROCHES (2004). Duffaut P. (coord.), *Manuel de mécanique des roches*. Tome 2, Les applications, Presses des Mines, Paris, 482 p.
- CORROY, G. ET GUEIRARD, S. (1956). L'alimentation en eau de la région orientale du département du Var et le barrage de Malpasset. *Travaux du Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de l'Université d'Aix-Marseille*, **V**, p. 103-126.
- COYNE, A. (1943). *Leçons sur les grands barrages*. École nationale des ponts et chaussées, 186 p. (ronéo).
- CROSNIER-LECONTE, J. (1959). Note sur l'organisation des reconnaissances géologiques à Électricité de France. In CALEMBERT, L. et LEGRAYE (Ed.), Colloque international « *Problèmes géologiques et hydrologiques relatifs aux barrages et aux bassins de retenue* ». *Congrès et colloques de l'Université de Liège*, **14**, p. 7-28.
- DUFFAUT, P. (2010). Malpasset, la seule rupture totale d'un barrage voûte. *Revue française de Géotechnique*, n° 131-132, p. 5-18.
- GIGNOUX, M., BARBIER, R. (1955). *Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques*. Masson, 343 p.
- GOGUEL, B. (2010). Rapport géologique Malpasset. *Revue française de Géotechnique*, n° 131-132, p. 25-26.
- HABIB, P. (1950). Détermination des modules d'élasticité des roches en place. *Annales de l'Institut technique du Bâtiment et des Travaux publics*, **145**, p. 27-35.
- HABIB, P. (1987). The Malpasset Dam Failure. In LEONARDS G.A. (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on Dam Failures*, Elsevier, Amsterdam, p. 331-338.

- HABIB, P. (2010). La fissuration du gneiss de Malpasset. *Revue française de Géotechnique*, n° 131-132, p. 19-22.
- LEONARDS, G. A. (Ed.) (1987). *Proceedings of the International Symposium on Dam Failures*, Purdue University, Lafayette, Indiana, 1982, et *Engineering Geology*, **24**, (1-4).
- LÉVY, M. (1895). Quelques considérations sur la construction des grands barrages. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, **121**, p. 288-300.
- LOMBARDI, J. (1986). Deux cas récents de désordres à des barrages voûtes. *Travaux*, fév. 1986, p. 63-64.
- LONDE, P. (1973). *La mécanique des roches et les fondations des grands barrages*. Commission internationale des grands barrages (CIGB), Paris, 108 p. [mis à jour avec LE MAY, Y. (1993), *Rock foundations for dams*, Commission internationale des grands barrages (CIGB), Paris].
- LONDE, P., SABARLY, F. (1966). La distribution des perméabilités dans la fondation des barrages voûtes en fonction du champ de contraintes. *Compte Rendu du 1^{er} Congrès international de Mécanique des Roches*, Lisbonne, 8-6, p. 517-521.
- LOUIS, C. (1968). Étude des écoulements d'eau dans les roches fissurées et de leur influence sur la stabilité des massifs rocheux. *Bulletin de la Direction d'Études et Recherches d'EDF*, (A), 3, p. 5-132.
- LUGEON, M. (1933). *Barrages et Géologie. Méthodes de recherches, terrassement et imperméabilisation*. Rouge et Compagnie, Lausanne, et Dunod, Paris, 139 p.
- MARY, M. (1968). *Barrages voûtes. Historique, accidents et incidents*. Dunod, Paris, 241 p.
- MAURY, V. (1970). *Mécanique des milieux stratifiés*. Dunod, Paris, 128 p.
- PAIGE, S., (Ed.) (1950). Application of Geology to Engineering Practice: Berkeley volume. *Geological Society of America*, 577 p.
- POST, G., BONAZZI, D. (1987). Latest thinkings on the Malpasset accident. In LEONARDS, G.A. (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on Dam Failures*, Elsevier, Amsterdam.
- ROUZET, J. (2009). *Catastrophes en France*. Ixelles éditions, Bruxelles, 300 p.
- SCHNEIDER, B. (1967). Moyens nouveaux de reconnaissance des massifs rocheux. *Ann. Inst. Techn. Bâtiment Trav. Publics*, p. 235-236, p. 1055-1093.
- TALOBRE, J. (1957). *La mécanique des roches appliquée aux Travaux publics*, Dunod, Paris, (2^e éd. Mise à jour, 1966), XX + 444 p.
- WONG, B., DAUBORD, B. (1986). Barrage de Roselend, mise en œuvre d'un « tapis amont » pour maîtriser les fuites en fondations. Leçons pour les projets à venir. *Travaux*, fév. 1986, p. 49-51.