COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES

VINGT SEPTIEME CONGRES DES GRANDS BARRAGES MARSEILLE, JUIN 2021

### BARRAGE DE MALPASSET L'ACCIDENT DU 2 DECEMBRE 1959

Comité Français des Barrages et Réservoirs<sup>1</sup>

### 1. LA CONCEPTION DU BARRAGE

Le projet du barrage de Malpasset dans le département du Var débute véritablement après la seconde guerre mondiale. Les besoins en eau pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable d'une population en forte augmentation du fait du tourisme et, dans une moindre mesure, le souhait de limiter les crues, amènent le Conseil Général du Var, maître d'ouvrage, à envisager la réalisation d'une retenue de 50 millions de mètres cubes de capacité dans la vallée du Reyran. C'est un torrent éphémère de 25 km de longueur rejoignant la Méditerranée devant la ville de Fréjus, après confluence avec l'Argens.

Les études se sont déroulées de 1946 à 1951, pour un site choisi au resserrement rocheux de Malpasset. Elles ont comporté notamment des reconnaissances géologiques qui ont constaté la bonne étanchéité de la cuvette du barrage et des roches de fondation non altérées, malgré la fracturation mise en évidence au cours de ces reconnaissances.

Le rocher en rive droite est un gneiss massif. En fond de vallée et en rive gauche, le rocher présente une tendance schisteuse marquée.

La forme de la vallée et la nature des fondations amènent le concepteur, André Coyne, à projeter un barrage de type voûte en béton ; technique qu'il a alors déjà mise en œuvre plus d'une quinzaine de fois, depuis le barrage de Marèges achevé en 1935, jusqu'à Tignes (H 180 m) en 1952. Les conditions d'incidence en

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Guirec Prévot, Alain Carrère (auteur de la fig. 3), Bernard Goguel, Patrick Le Delliou, Thomas Viard et Paul Royet

haut de la rive gauche conduisent à y placer une culée poids haute de 15 m, avec un mur en aile la protégeant des poussées de l'eau.

Les caractéristiques finalement retenues pour le projet sont les suivantes :

- hauteur au-dessus de la fondation : 66,5 m,
- longueur en crête : 222 m à la cote 102,50,
- barrage voûte (rayon de référence 105 m),
- épaisseur : 7 m à la base et 1,5 m en crête (à la cote 102,55)
- volume de béton : 48 000 m<sup>3</sup>

Les organes hydrauliques comprennent (Fig. 1) :

- un conduit de vidange de fond de 1,5 m de diamètre traversant l'ouvrage à sa base, pour évacuer environ 40 m<sup>3</sup>/s,
- (2) un évacuateur de crues par seuil à surface libre long de 30 m à la cote 100,40,
- (3) une prise d'eau par conduite de 0,9 m de diamètre à la cote 79,50 en RG,
- (4) un tapis de réception en fond de vallée pour (1) et (2).





### 2. LES TRAVAUX ET LA MISE EN EAU

Le chantier démarre le 1<sup>er</sup> avril 1952. Les travaux se déroulent sur plus de deux ans pour être achevés en octobre 1954.

Le remplissage commence dès la fin de l'année 1954, mais pendant 4 ans, suite à des retards dans les expropriations et à une succession de sécheresses, la retenue ne dépasse la cote 87 m NGF, soit une charge sur la voûte d'environ

45 mètres de hauteur d'eau. La cote 94,5 m NGF est atteinte au printemps 1959 soit encore 4 m sous le niveau de remplissage normal de la retenue 98,50.

Le suivi du comportement est, pendant les travaux puis surtout le remplissage, réalisé grâce à un dispositif d'auscultation qui comporte essentiellement des mesures topographiques (annuelles) et une surveillance régulière des débits de fuites. Ce dispositif correspond à ce qui est classiquement adopté à cette époque.



Fig. 2 Vue du barrage en fin de construction (photo ACJB)

Les mesures montrent un comportement tout à fait conforme aux attentes, au moins jusqu'à juillet 1958. La campagne topographique faite en juillet 1959, mais finement analysée seulement après la rupture, montre un déplacement de la base du barrage de 13 mm vers l'aval (déplacement relativement important mais pas alarmant, d'autant plus qu'il est quasiment symétrique). Une semaine avant la rupture, par temps très pluvieux, est signalée une fuite assez haute en rive droite et à 20 m en aval de la voûte (donc dans une zone non affectée par la rupture).

Très peu avant la rupture, des fissures auraient été vues dans le tapis de protection de la zone de déversement, au pied aval du barrage. Cela pourrait correspondre à des signes avant-coureurs de la rupture, mais cette partie ayant été détruite, il est difficile d'aller plus loin dans d'éventuelles affirmations.

## 3. LA RUPTURE DU BARRAGE

Dans les derniers jours de novembre 1959 et début décembre, des pluies importantes s'abattent sur la région en provoquant une montée rapide du plan d'eau. Le soir du 2 décembre, il atteint la cote 100,12 soit 28 cm sous le déversoir de l'évacuateur de crue.

La vanne de vidange, qui aurait dû, pour la gestion des crues, être ouverte à la cote de retenue 98,50 (donc la veille), n'a été ouverte qu'en fin d'après-midi le 2 décembre, après réunion sur place d'une dizaine de responsables en vue de décider de la conduite à tenir pour gérer au mieux la crue prévisible avec le très prochain déversement sur le seuil de l'évacuateur (le chantier de l'autoroute A8 était en cours à proximité aval du barrage). Son ouverture plus précoce n'aurait retardé que de quelques heures l'issue fatale, inimaginable alors.

La rupture est survenue subitement dans la soirée du même 2 décembre 1959, un peu après 21 h. De la moitié gauche du barrage, il n'est resté que la culée en haut de la rive. Un volume considérable de fondation a été emporté, privant le barrage de son appui gauche. La voûte s'ouvre totalement en rive gauche puis se casse en rive droite, ne laissant en place que la partie centrale basse et les plots de son extrémité rive droite.

Le détail du phasage de la rupture est présenté en figure 3.

Une masse de 50 millions de mètres cubes d'eau s'engouffre soudainement dans la vallée du Reyran, dévastant tout sur son passage. Les traces laissées par le flot ont été soigneusement relevées. L'onde de rupture a débordé le col à la cote 85, à 500 m en aval rive gauche, mais a surtout suivi la vallée. Les bas quartiers de la ville de Fréjus sont submergés par une vague d'eau et de boue 21 minutes plus tard. La lame d'eau fait encore 3 m lorsqu'elle rejoint la côte. Des ondes de submersion sont présentées en Annexe de cet article.

Les conséquences sont dramatiques, c'est le plus grave accident connu de barrages en France : la rupture a causé 423 morts et 7 000 sinistrés. Elle a détruit totalement 155 immeubles et maisons et endommagé 800 autres. 3200 ha de terres cultivées ont été touchés, dont 700 ha totalement décapés. La ville de Fréjus se trouve isolée ; routes, téléphone, électricité, eau sont coupés ; la Nationale 7 et la voie ferrée sont emportées sur plusieurs centaines de mètres.

Face à la catastrophe et malgré la confusion due à l'absence de moyens de communication, les secours et l'entraide s'organisent. L'hôpital devient un centre de rassemblement et de soins d'urgence ; sa chapelle fait office de morgue. Les renforts arrivent dès le lendemain à l'aube : CRS, gendarmerie, sûreté nationale, armée, Croix-Rouge, ambulances...

Le poste de commandement avancé du Préfet du Var est installé aux Arcs, à 20 km à l'ouest. La mairie réquisitionne les hommes valides pour porter secours à la population sinistrée et organise la collecte d'informations (morts et disparus), l'hébergement d'urgence ainsi que les ravitaillements en eau et en pain.

Des « laissez-passer » sont nécessaires pour accéder à la zone sinistrée et les personnes se voient attribuer des cartes d'identification. Les travaux de rétablissement des réseaux (communications, eau, électricité...) ainsi que des voies de communication sont rapidement entrepris. Les circulations routière et ferroviaire seront rétablies le 10 décembre.

Malgré des travaux de déblaiement et de reconstruction commencés rapidement, la ville mettra des mois à retrouver un « visage normal ».



*Fig.* 3 Phasage de la Rupture (1/2)



Fig. 3 Phasage de la Rupture (2/2)

### 4. LES CAUSES DE LA RUPTURE

Une enquête administrative et des procédures judiciaires ont été menées pour déterminer les causes de la catastrophe et rechercher d'éventuelles culpabilités. Les enquêtes, auditions et expertises ont duré de nombreuses années. L'action judiciaire s'est éteinte en 1967 par un arrêt de la Cour de Cassation, concluant « qu'aucune faute, à aucun stade, n'a été commise ».

Les causes réelles de la rupture n'ont été élucidées qu'au bout de plusieurs années de reconnaissances, études et recherches, notamment dans le domaine de la *mécanique des roches*, science encore balbutiante en 1959. La première publication de synthèse date de juillet 1967 dans la revue Travaux, sous la signature de Jean Bellier. Les suivantes sont indiquées ci-après en références.

L'explication n'est pas, comme cela a pu être évoqué, quelque insuffisance de la voûte elle-même, dont le béton était de très bonne qualité ; ni l'érosion progressive de la fondation, ni encore une déstabilisation de la fondation et du barrage par des tirs de mines liés à la construction de l'autoroute dans la vallée voisine.

L'origine de la catastrophe réside dans la rupture soudaine, quasi explosive, d'un grand coin rocheux en rive gauche, qui a laissé une cicatrice en forme de dièdre. Cette hypothèse est dorénavant partagée par la communauté scientifique : la rupture brutale de l'appui rive gauche combine plusieurs facteurs qui sont la géométrie du massif rocheux, sa déformabilité, et les actions de l'eau en pression.

La fondation comporte, comme tout massif rocheux, plusieurs familles de failles, fractures, fissurations ou schistosité (quatre termes allant de l'échelle la plus large à la plus fine). Ces discontinuités découpent le massif en blocs rocheux ; La stabilité de ces masses rocheuses dépend des caractéristiques géomécaniques le long de ces plans, ainsi que des pressions de l'eau.

Le site de Malpasset est affecté classiquement par trois familles de discontinuités. En rive gauche, les deux familles principales présentent pour l'une une inclinaison plongeant à environ 45° vers l'aval (plan de foliation amont) et pour l'autre à environ 45° vers l'amont (faille aval).

La première famille à l'amont présente des plans régulièrement espacés et ayant subi des cisaillements et des altérations plus ou moins prononcés pendant leur histoire géologique. Le remplissage de la retenue a introduit l'eau dans ces discontinuités, d'autant que la poussée exercée par la voûte a tendance à provoquer une légère déformation vers l'aval, contribuant à ouvrir ces joints. Se sont ainsi développées d'importantes pressions interstitielles au cœur même de la fondation, en profondeur sous l'appui du barrage.

La seconde famille se traduit, à l'aval du barrage, par une faille importante avec un remplissage, sur plusieurs décimètres d'épaisseur, de matériau argileux présentant de faibles caractéristiques mécaniques. La poussée transmise par la voûte à sa fondation applique des contraintes de compression dans le rocher déformable, en y provoquant une diminution très importante de sa perméabilité. Les sous-pressions générées au cœur de la fondation par la famille amont de discontinuités ne peuvent pas trouver d'exutoire. Elles agissent comme un vérin sous la masse rocheuse découpée par l'ensemble des deux familles. La faible résistance au cisaillement le long de la faille aval ne peut compenser cette poussée, et c'est tout le coin rocheux (et la partie de barrage qui le surmonte) qui se déplace brutalement.



Fig. 4 Schéma de la cinématique de rupture

La suite, telle qu'illustrée en Fig. 3, combine plusieurs étapes successives ou simultanées. En deux temps au moins, très proches, est ainsi survenue la ruine quasi complète de l'ouvrage.

# 5. LES ENSEIGNEMENTS TIRES

Au niveau technique, *la mécanique des roches* devint une science à part entière, avec en particulier le développement de l'étude de stabilité des coins rocheux aussi appelée « méthode des coins de Londe » (cette méthode est basée sur l'identification des familles de discontinuités dans les appuis, l'évaluation de leurs caractéristiques mécaniques, et la prise en compte des sous-pressions). Sont considérées aussi l'influence des contraintes sur la perméabilité, phénomène totalement ignoré à l'époque, et surtout la vérification de la raideur (module de déformation à l'échelle du massif d'appui) des appuis rocheux des voûtes.

La mise en évidence de limportance des conditions de fondation et la nécessité absolue de mener des investigations très détaillées et attentives sur les

caractéristiques des terrains d'appui, et la justification de leur stabilité, constituent un apport majeur de l'analyse en retour de cet accident.

Le drainage du pied aval des voûtes, de façon à libérer les éventuelles souspressions présentes dans le rocher constitue une règle quasi systématique. C'est ainsi que dans les années qui suivirent l'accident, de très nombreux barrages voûtes existants, dans le monde entier, se virent équipés de voiles de drainage additionnels et de piézomètres.

L'auscultation des barrages devient la règle absolue notamment et surtout pendant la phase de première mise en eau qui constitue une étape cruciale de la vie de ces grands ouvrages.

Les conditions de mises en eau sont affinées avec des étapes organisées en paliers permettant d'observer et d'apprécier le comportement réel du barrage au fur et à mesure de la montée du niveau de la retenue.

Les techniques d'auscultation elles-mêmes font des progrès importants notamment pour les barrages-voûtes avec la mise en œuvre de pendules permettant de détecter plus finement et surtout rapidement les mouvements éventuels des ouvrages. Les pendules inversés, précieux pour la surveillance fine des petits déplacements de fondation, ne sont apparus qu'en 1958 (simultanément au Portugal et en Suisse).

L'accident de Malpasset a également entraîné un renforcement de la réglementation technique française avec :

- en 1967, la mise en place du *Comité Technique Permanent des Barrages* chargé d'examiner et d'évaluer les dossiers d'avant-projet de tous les barrages de plus de 20 m de hauteur au-dessus du terrain naturel.
- dès 1968, obligation aux propriétaires de barrages de plus de 20 m de hauteur et de plus de 15 Mm<sup>3</sup> de capacité de mettre en place un *Plan Particulier d'Intervention* (PPI), approuvé par le Préfet et rendu public : modélisation de l'onde de rupture, réseau de sirènes dans la zone dite « du premier quart d'heure », et plan d'évacuation de l'ensemble des zones menacées en cas de rupture ;
- une circulaire interministérielle du 14 août 1970 introduisant la notion de « barrage intéressant la sécurité publique ». Y figurent les contraintes de surveillance et d'entretien, à la charge du propriétaire, et les modalités du contrôle par les services de l'Etat ;



aériennes avant rupture (1955) [gauche] après rupture (1959) [milieu] et avec un fond de carte contemporain [droite]

# ANNEXE - Cartes de l'onde de submersion

Site du barrage

# RÉFÉRENCES

Alcrudo F. Gil E., 1999, *The Malpasset Dam break case Study*, Concerted Action on Dam-Break Modelling (CADAM) proceedings, Zaragoza Meeting; 18-19 November 1999

Bellier J., 1967. *Le barrage de Malpasset*, Revue Travaux- p.3-23 - Juillet 1967 (english translation 1976 by J. Langbein, presented by P. Londe at the *Conference on Evaluation of Dam Safety*, Pacific Grove, California, Nov 28-Dec 3, 1976, pp. 72-136)

Boudou M. 2015. *Monographie de la rupture du barrage de Malpasset, 2 décembre 1959*, 46 p., Annexe (T.2) de sa thèse "Approche multidisciplinaire pour la caractérisation d'inondations remarquables". Univ. Montpellier III.

https://www.researchgate.net/publication/301790756

Bourdarot E. *Discussion sur les mécanismes de défaillance des barrages-voûtes. Retour d'expérience de l'accidentologie et de l'incidentologie.* Colloque CFBR Sûreté des barrages et enjeux, Chambéry, novembre 2016.

Carrère A. 2010. Les leçons de Malpasset, leur application aux projets de barrages d'aujourd'hui. Revue française de géotechnique, Paris, 131-132, 37-51.

CASS 1967. Cour de cassation, chambre criminelle. Audience publique du jeudi 7 décembre 1967. N° de pourvoi : 66-91852. Publié au bulletin.

CFBR 2009. Barrage de Malpasset (Var), l'accident du 2 décembre 1959, 5 p.

CFBR 2018. Recommandations provisoires pour la justification du comportement des barrages-voûtes – Recommandations du CFBR, 150 p. (english version available) https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/recommandations\_cfbr\_2018\_voutes.pdf

Commission d'enquête (administrative) – Le Génie Civil, 1960, 255-257

Commission judiciaire d'expertise – Le Génie Civil, 1965, 239-246 et 277-283

Commission judiciaire de contre-expertise – Le Génie Civil, 1965, 14-20 et 99-108

Comité Français de Mécanique des Roches, Duffaut P. coord., *Manuel de mécanique des roches*, Presses des Mines, Paris : 1 - Fondements, 2000, 265 p., 2 - Les applications, 2004, 458 p., 3 - Retours d'expérience, Génie minier et pétrolier, 239 p., 4 - Retours d'expérience en Génie civil, 2013, 451 p, Malpasset pp. 29-39 (repris de RFG 2010)

Coyne A. 1943. Leçon sur les barrages à l'Ecole nationale des ponts et chaussées.

Coyne A. 1956. Les barrages-voûtes, leur philosophie. Journal of Power division ASCE, 52, 959, 1-17.

Duffaut P. 2010. *Malpasset, la seule rupture totale d'un barrage-voûte.* RFG 131-132, 5-18.

Duffaut P. 2010. *Cinquantenaire de la rupture des fondations du barrage de Malpasset*. Bull. Comité Français d'Histoire de la Géologie.

Duffaut P., 2011, *What modern rock mechanics owe to to the Malpasset arch dam failure*, 12th ISRM Congress in Beijing, Qian & Zhou (eds), pp. 701 and 1889-92.

Duffaut P. 2013. *The traps behind the failure of Malpasset arch dam, France, in 1959.* Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, *5*(5), 335-341.

Goguel B., 2010, *Avant-propos au rapport géologique Malpasset de Jean Goguel (1960)*, Revue française de géotechnique, Paris, n° 131-132, 23-24

Goguel B. 2018. *Malpasset arch dam failure at first impoundment*. CIGB Bulletin 180, Dam Surveillance. Lessons learnt from case histories, 55-60.

Goguel J., 2010, *Rapport géologique Malpasset (daté du 17 avril 1960)*, Revue française de géotechnique, Paris, n° 131-132, 23-24

Goutal N., 1999, The Malapsset Dam Failure : An overview and test case definition -Concerted Action on Dam-Break Modelling (CADAM) proceedings, Zaragoza Meeting; 18-19 November 1999

Habib P., 2010, *La fissuration des gneiss de Malpasset*, Revue française de géotechnique, Paris, n° 131-132, 19-22

Hervouet J.M., Petitjean, A., (1999), *Malpasset dam break revisited with two dimensional computations*, Journal of Hydraulic Research, 37 (6) 777-788.

ICOLD-CIGB (1974). Lessons from dam incidents. Leçons tirées des accidents de barrages, pp. 33-40.

Johnstone, W.M., Assaf, H. Sakamoto D., Hartford, D., *Analysis of the Malpasset dam failure using GIS and engineering models* - GeoTEc Symposium 2003 – Vancouver

Johnstone W.N., 2005, Verification and Validation of the Life Safety Model Simulator using the Malpasset Dam Failure, Spatial Vision Group Inc report, Vancouver

Larouzée J., Duffaut P., Goguel B., 2021, *La rupture du barrage de Malpasset (France, 1959) : un cas emblématique d'accident organisationnel ?* Congrès CIGB, Marseille 27 p.

Londe P., 1965, *Une méthode d'analyse à trois dimensions de la stabilité d'une rive rocheuse*, Annales des Ponts et Chaussées, 135 (1), 37-60

Londe P., Sabarly F., 1966, *La distribution des perméabilités dans la fondation des barrages voûtes en fonction du champ de contraintes*, 1er Congrès Internat. Mécanique des Roches, Lisbonne, 8-6, p. 517-521

Londe P. 1973, *La mécanique des roches et les fondations des grands barrages – Rock mechanics and dam foundation design.* CIGB-ICOLD, 102 p. ("special Bulletin" sponsored by the International Society for Rock Mechanics, edited by the ICOLD Committee on International Relations).

Londe P., Le May Y. 1993, *Rock foundations for dams – Fondations rocheuses de barrages.* ICOLD-CIGB Bulletin n° 88, updated edition of the 1973 "special Bulletin".

Londe P. 1987. The Malpasset dam failure. Eng. Geology, Elsevier, 24, 296-329.

Lumbroso D., 2011, *The development of a life safety model to estimate the posed to people by dam failures and floods*. HR Wallingford. 2011

Mary M. 1968. Barrages voûtes, historique accidents et incidents. Paris, Dunod. 36-77.

Post G., Bonazzi D. 1987. Latest thinking on the Malpasset accident. Eng. Geology, Elsevier, 24(1-4), 339-353.

Talobre J., 1957, La mécanique des roches, Dunod, Paris, 444 pages, 2è éd. 1966.

Valiani A., 2002, Case Study: Malpasset Dam-Break Simulation using a Two-Dimensional Finite Volume Method, Journal of Hydraulic Engineering, may 2002

### RESUME :

Cette communication propose une synthèse de l'accident de Malpasset pour les personnes qui participeront au congrès de la CIGB à Marseille (à 100 km à vol d'oiseau du lieu de a catastrophe) en 2021, et qui auront l'opportunité ou non de pouvoir se rendre sur le site à cette occasion. Aucune information nouvelle n'est fournie ici. On s'attache à expliquer le contexte de la construction du barrage, le phasage du scénario accidentel, les causes de la rupture et les enseignements à la fois techniques, administratifs et réglementaires de l'événement. Une bibliographie fournie est proposée afin que le lecteur puisse approfondir sa connaissance de cette catastrophe qui marqua la profession en France, mais aussi dans le monde.

#### SUMMARY:

The paper provides a summary of the Malpasset accident for people who will participate in the CIGB congress in Marseille (100 km as the crow flies from the site of the disaster) in 2021 and who will have the opportunity or not to visit the site. No new information is provided. The paper aims at explaining the context of the dam construction, the accident scenario stages, the causes of the failure and the technical, administrative and regulatory lessons of the event. An abundant bibliography is provided, so that the reader can deepen his knowledge of this dramatic event which marked the profession in France, but also in the world.