BARRAGE DE L'ONE (31) – CAS D'ETUDE D'ANALYSE DE RISQUE POUR UN BARRAGE VOUTE TORRENTIEL

One's dam (31) – Risk analysis case study for a torrential arch dam

Jérôme PALISSE
ONF, Département Risques Naturels, pôle RTM, 9 quai Créqui 38014 Grenoble France
jerome.palisse@onf.fr

Sarah BRIAND, Vincent GILI
Direction Départementale des Territoires de la Haute-Garonne, Toulouse France
sarah.briand@haute-garonne.gouv.fr vincent.gili@haute-garonne.gouv.fr

Yannick MAURANNE, François SASSUS
Service de Restauration des Terrains de Montagne de Haute-Garonne, St Foix, France
yannick.mauranne@onf.fr ; francois.sassus@onf.fr

Moez JELLOULI
ISL, Paris, France
moez.jellouli@isl.fr

MOTS CLEFS

Torrentiel, sédimentation, étude de dangers, barrage-voûte, mécanique des roches

KEY WORDS

Torrential, sedimentation, risk analysis, arch dam, rocks mechanic

RÉSUMÉ

Du milieu du XIX^{ème} siècle jusqu'au milieu du XX^{ème}, plusieurs crues torrentielles ont atteint la ville de Bagnères-de-Luchon dans les Pyrénées. Suite à l'engravement du lit de l'One et de la Pique, l'État a décidé en 1956 de construire deux importants ouvrages d'atterrissement sur ces cours d'eau. Le projet a été porté par l'administration des Eaux et Forêts. Conçus à une époque où les barrages voûtes béton représentaient une tendance et une innovation technologique, ce choix a été proposé pour les ouvrages de Castel-Vieil et de l'One, clairement atypique encore aujourd'hui dans le domaine de la correction torrentielle.

Ainsi, le barrage de l'One est un barrage voûte béton de 25 m de haut et de 55 m de large en crête, imaginé est construit dans les années 60, fondé sur des schistes carburés. Il avait été conçu dans l'objectif de créer une rétention de 350 000 m^3 de matériaux. Entre l'idée et la concrétisation de ces choix, la tragédie de Malpasset a eu lieu.

Une première étude de dangers (EDD) a été réalisée en 2015 sur le barrage de l'One, puis mise à jour en 2021. Face au classement de l'ouvrage et à son contexte, il apparaissait nécessaire d'interroger les conditions de fondation de l'ouvrage, prenant compte l'ensemble des développements et des retours d'expériences pour les barrages voûtes « hydrauliques ». Ainsi, une première étude de stabilité a été réalisée par un bureau d'études agréé avec une modélisation par éléments finis s'appuyant notamment sur des investigations géotechniques. Les conclusions de cette étude ont mis en doute la stabilité de la culée en rive droite pour des situations courantes, faisant craindre des travaux lourds ou un sort proche de l'ouvrage de Castel-Vieil écrêté de 5 m en 2015. Face à ce diagnostic ne semblant pas refléter le vécu de l'ouvrage, il a alors été choisi de confier à ISL la mission de diagnostiquer les études précédentes et de réaliser une nouvelle étude de stabilité prenant soin d'accorder une grande importance aux hypothèses de base de l'étude.

ABSTRACT

From the mid-19th century to the mid-20th century, several torrential floods reached the town of Bagnères-de-Luchon in the Pyrenees. Following the engraving of the bed of the One and the Pique, the State decided in 1956 to build two major checks dams on these watercourses. The project was led by the Water and Forests administration. Designed at a time when concrete arch dams represented a trend and a technological innovation, this choice was proposed for Castel-Vieil and One dams, clearly atypical even today in the field of torrential correction.

Thus, the One dam is a concrete arch dam 25 m high and 55 m wide at the crest, designed and built in the 1960s, based on carburized shales. It was designed with the objective of creating a retention of 350,000m³ of materials. Between the idea and the realization of these choices, the tragedy of Malpasset happened.

A first hazard study (EDD) was carried out in 2015 on the One dam, then updated in 2021. Given the classification of the work and its context, it appeared necessary to question the foundation conditions of the structure, taking into account all the developments and feedback for "hydraulic" arch dams. Thus, a first stability study was carried out by an approved design office with finite element modeling based on geotechnical investigations. The conclusions of this study cast doubt on the stability of the abutment on the right bank for common situations, raising fears of heavy work or a similar fate to the Castel-Vieil arch dam, cut by 5m in 2015. Facing this diagnosis that does not seem reflect the reality, it was then chosen to entrust ISL with the mission of diagnosing the previous studies and carrying out a new stability study taking care to attach great importance to the basic hypotheses of the study.

1. CONTEXTE HISTORIQUE DE CREATION DE L'OUVRAGE

1.1.Historique et définition initiale de l'ouvrage

La ville de Bagnères-de-Luchon se situe dans le département de Haute-Garonne en France. La majorité de la ville est située en rive gauche de la rivière Pique sur terrains fluvio-glaciaires, à hauteur de la confluence entre cette dernière et l'One qui est son affluent. L'One, qui draine un bassin versant de 143 km² à l'entrée de la ville, est formée par la confluence de la Neste d'Oô, du ruisseau Portet, de la Neste d'Oeuil, du Gourron (cf. Figure 1). L'One présente un caractère torrentiel marqué, du fait notamment de ses affluents (le Gourron en particulier) qui ont donné lieu à de nombreux évènements historiques, recensés dès 1725.

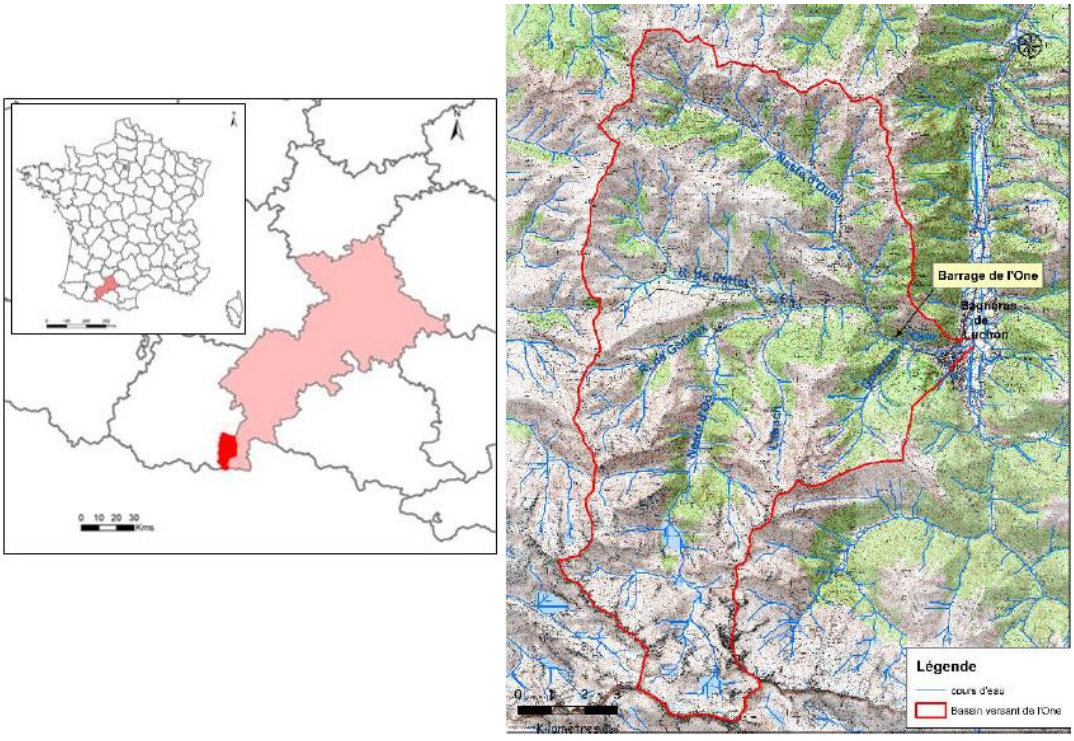

Figure 1 : localisation du bassin versant de l'One – extrait EBR One, cf.[12]

C'est à l'issue de la crue des 21-22 juillet 1925, que le projet de « barrages de retenue sédimentaire » est imaginé, mais non réalisé faute de financement. C'est la survenue de la crue du 26/07/1956 (~débit 100 m^3/s) qui, réveillant le souvenir de celle de 1925, a fait renaître le projet. La décision est prise par l'administration des Eaux et Forêts de construire deux nouveaux barrages de correction en amont de la ville sur la Pique à Castel-Vieil et l'One à Sourrouilh. Le choix s'est porté sur des barrages de rétention de matériaux, les événements passés faisant état de dégâts par engravement principalement.

Constatant l'impossibilité d'acquérir des terrains dans le bassin versant pour procéder à une correction active en reboisement, les ingénieurs des Eaux et Forêts s'orientent logiquement vers un ouvrage de sédimentation, moins onéreux qu'un curage régulier du lit. Le barrage de l'One étant majeur par ses dimensions pour le RTM, sa conception et sa construction sont très documentés comme en témoigne l'ensemble des documents du dossier d'ouvrage (cf. [1] à [6]). Ceci notamment parce qu'il est fait le choix d'une typologie de barrage voûte, en vogue à l'époque (cf.[9]) au sein de la communauté des « barragistes » dont les ingénieurs des Eaux et Forêts faisaient partie. Cette documentation conservée revêt un caractère particulièrement important comme nous le verrons par la suite. L'établissement du projet s'étala de 1956 à 1961, la construction se fera de 1962 à 1964.

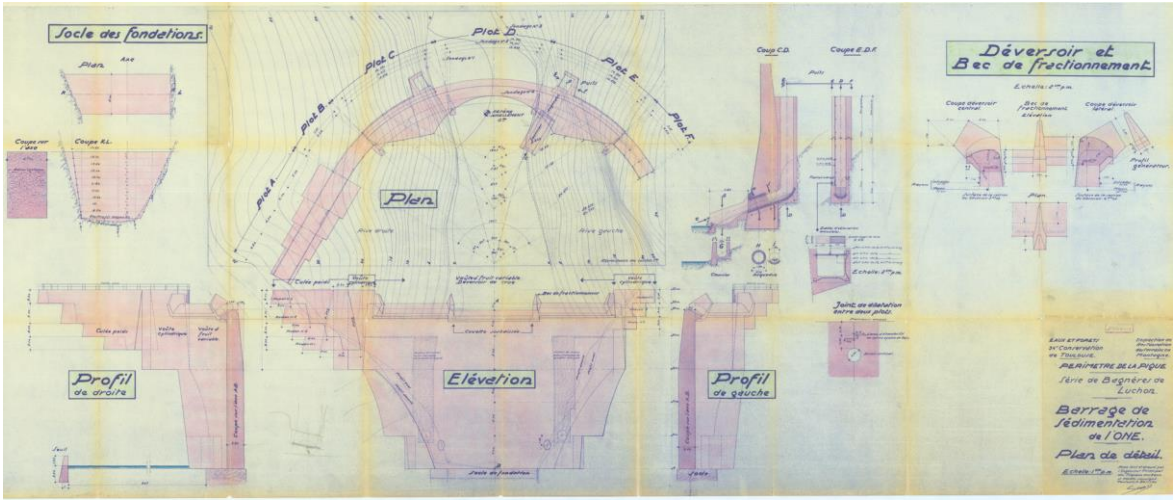

Figure 2 : plan de détail du barrage de l'One - Eaux et Forêts -Janvier 1960

Préalablement au barrage de l'One, le barrage de Castel-Vieil sur la Pique à l'amont de Bagnères a été construit sur les mêmes principes généraux en 1959-60 : barrage voûte de sédimentation/rétention, avec toutefois des dimensions sensiblement plus modestes (15 m de haut à la cuvette pour une corde à la voûte de 17 m). C'est le premier barrage voûte du RTM dans les Pyrénées, qui servira d'appui aux demandes pour construire le barrage sur l'One et qui permettra aussi aux ingénieurs de tirer les premiers enseignements de ce prototype (cf.[1]). Les deux barrages procèdent des mêmes principes et apparaissent alors liés dans leur sort, comme nous le verrons plus tard. L'avant-projet de l'One établi en 1958 (cf. [1]) fait état « *de deux berges rocheuses […] formées par des schistes calcaires et schistes carburés compacts et durs pouvant supporter de fortes compression* » - ces qualificatifs ne sont a priori pas issues d'essais spécifiques. Il est donc clairement indiqué dans les principes de conception que l'ouvrage a pour objectif de retenir les matériaux (barrages de rétention), qu'il doit être atterri à terme – sans être curé. Les dossiers devront être soumis à un « spécialiste » comme le bureau Veritas ou EDF. Il est aussi émis le souhait de réserver une partie de ces crédits à des investigations supplémentaires (rocher, alluvions, minages, relevé topo, etc.).

Figure 3 : barrage de l'One en 2003 et barrage de Castel-Vieil en 2013 - extrait EBR One, cf.[12]

1.2.Catastrophe de Malpasset et construction du barrage de l'One - Les appuis rocheux

La catastrophe de Malpasset eut lieu le 2 décembre 1959, soit en plein établissement des études du barrage de l'One. Le service RTM dans sa demande de « *dépenses d'équipement* » qui fait directement suite au projet (cf. [2]) évoque la catastrophe de Malpasset et, se voulant rassurant sur le dimensionnement, promet des sondages complémentaires, la venue d'un géologue expert et la réalisation de l'ouvrage en deux tranches de travaux (15 m, puis 25 m de hauteur, avec la possibilité de finaliser le barrage à 15 m).

Comme convenu, la note de calcul est transmise à EDF pour un « avis » en tant que spécialiste technique des barrages voûtes, qui considère en retour par un courrier (cf. [3]) que le « *projet de barrage présenté est tout à fait acceptable* » et recommande des essais de sol. Parallèlement (cf.[4]) les services RTM ont accompagné un Professeur de Géologie de l'Université de Toulouse sur site. Il en ressort les premières mises en doute quant à la qualité du rocher et aussi des préconisations pour réaliser une campagne d'investigations sur le massif rocheux. Cette campagne complémentaire est réalisée à l'automne 1960, constituée de 8 sondages inclinés dans les berges, avec prélèvements et essais en laboratoire (essais d'écrasement) et des essais Lugeon in-situ (cf. [5]). Ces éléments (projet et rapport d'essais) sont directement fournis pour avis à EDF (cf.[6]) qui exprime qu'étant donné que la résistance mécanique des échantillons « *est très bonne* », que la perméabilité d'ensemble et la compacité d'ensemble seront nettement améliorées par la réalisation d'injections du massif (8 forages d'injection réalisés en rive droite - 1962) : « *il n'y a pas d'inquiétude à avoir* ».

Sur la base de ces éléments, l'accord pour la construction de la première tranche intervient en début d'année 1961. Le marché de travaux est passé en 1962 et suite à l'avis favorable d'EDF à l'ouverture des fouilles, la seconde tranche est validée pour atteindre 25 m de hauteur.

Ainsi, les notions de discontinuité au sein d'un massif rocheux pouvant piloter le comportement global d'une fondation d'appui ne sont pas étudiées. Les développements en mécanique des roches suite à la catastrophe de Malpasset n'ont pas encore eu lieu.

1.3.Le changement de rôle des barrages de l'One et de Castel-Vieil

Suite à une crue en 1977, le barrage de Castel-Vieil s'est rempli et fuit de toutes parts. La situation de l'One est moins préoccupante, le barrage se remplit beaucoup moins vite que prévu. En 1988 le niveau de sédiment dans la retenue n'atteint que 6 m. À cette occasion, le service RTM, constatant à propos des deux ouvrages que (cf.[12]) « à *cette époque* [de construction]*, personne ne s'était demandé ce qu'il y avait lieu de faire lorsque ces deux ouvrages seraient atterris, c'est-à-dire complètement remplis par les matériaux d'érosion »,* que la « mode » est à la plage de dépôts et dans un souci d'homogénéité dans le système de protection de Bagnères-de-Luchon, il est alors décidé de modifier le rôle des deux ouvrages en plage de dépôt en les vidangeant et les curant

régulièrement. Cette modification de gestion implique que l'ouvrage peut être assimilé à un barrage écrêteur de crue liquide et peut être classé parmi les grands barrages selon ses dimensions.

Dans la période actuelle, l'État toujours propriétaire de l'ouvrage représenté par la Direction Départementale des Territoires de Haute-Garonne (DDT 31) en a confié sa gestion aux services de Restauration de Terrain de Montagne (RTM) de l'Office National des Forêts (ONF), gestionnaire des ouvrages domaniaux de correction torrentielle, en continuité de l'administration des Eaux et Forêt de l'époque. Le barrage a été initialement classé A au sens de l'arrêté du 5 mai 2009, mais un déclassement en B (au sens du décret du 12 mai 2015) a été réalisé par APC le 16/05/2023.

En 2013, un épisode particulier de crue intervient à Bagnères-de-Luchon (cf Figure 4). Le barrage de Castel-Vieil, déverse sur toute sa largeur et est atterri avec un apport de 21 000 m^3 de matériaux. L'évènement accélère la réflexion sur l'arasement du barrage en mauvais état qui est alors décidé et réalisé en 2015. La faible efficience de l'ouvrage en tant que plage de dépôt et les difficultés des opérations de curage entamées par la suite (2018-2019) amènent l'État à revoir le mode de gestion de Castel-Vieil et à revenir vers le mode de gestion initial de l'ouvrage. Pour le même épisode de crue de 2013, le barrage de l'One déverse pour la première fois depuis sa construction, mais ne se remplit pas pour autant. Le comportement est semble-t-il satisfaisant, mais la situation du barrage de Castel-Vieil pèse sur le suivi sécuritaire du barrage de l'One.

Figure 4 : barrages de l'One et de Castel-Vieil lors de la crue de 2013

2. ANALYSE DE RISQUE ET ÉTUDES DE DANGERS DU BARRAGE DE L'ONE

Un 1989, une première visite du Cemagref est réalisée sur le barrage (cf. [7]). Rapportant à propos du fonctionnement du barrage qu'il est « *construit pour créer une plage de dépôts de matériaux de charriages* », de hauteur supérieure à 20 m et est situé à moins d'un kilomètre de la ville, il est décidé d'inclure l'ouvrage dans la liste des barrages répertoriés. En conséquence, il est demandé de se mettre en conformité avec la réglementation (circulaire du 14 août 1970), et de reprendre l'étude hydrologique de définition et de fonctionnement du barrage sur les principes alors en vigueur pour ce type de barrage. On note dans le rapport relativement à sa stabilité et aux appuis rocheux les éléments suivants : « *Par ailleurs, un barrage voûte est très sensible à la stabilité de ses appuis et sur ce point, il est beaucoup plus difficile de se prononcer, même si tous les traitements nécessaires semblent bien avoir été faits à la construction de l'ouvrage (forages, essais d'eau, voile d'injections, essais de contrôle*). *Par contre, aucun dispositif de drainage n'a été mis en place* ». L'ouvrage est alors équipé de l'instrumentation demandée (pendule, échelles limnimétriques, éléments d'accès, etc.). En 2004, lors d'une visite de contrôle, des anomalies sont observées sur le barrage : suintement important sur le parement aval, couronnement non étanche. L'étanchéité amont est refaite par voile en 2004-2005, mais cette dernière se détériorant rapidement, elle est retirée en octobre 2013. Un dispositif de drainage est également mis en place en 2005, de même que la reprise du contre-barrage aval et le remplacement de la fosse de dissipation par un radier en enrochement bétonné.

L'étude de dangers (EDD) initiale sur le barrage de l'One est produite en 2015 par la CACG (cf. [10]), juste après l'épisode de crue de 2013. Elle s'appuie sur de nombreuses études préalables (dont le dossier d'ouvrage exhaustif précédemment cité) et connexes (révision hydrologique, étude de stabilité, étude de l'onde de submersion, étude du risque d'instabilité de versant). La méthode d'analyse de risque qui y est mené (analyse fonctionnelle externe/interne, méthode AMDEC puis méthode des « nœuds de papillon ») est bien évidemment complétée par une étude de diminution des risques identifiés.

Le premier bilan indique que parmi les scénarios probables aucun ne se dégage en termes de criticité. Les 4 scénarios retenus (*A : Rupture par dégradation interne*, *B: Rupture par instabilité des appuis ou fondations*, *C : Rupture en crue* et *D : Rupture par érosion interne*) sont classés en « *risque tolérable, une réflexion poussée doit être menée visant à la réduction des risques* » par croisement entre une classe de gravité commune aux 4 scénarios « *G5 : désastreux* » et une classe de probabilité elle aussi commune aux 4 scénarios « *P1 : évènement très improbable : entre 10^{-5} et 10^{-4}* ».

Les mesures de maîtrise des risques indiquent donc « *que des points de dimensionnement doivent être confortés portant en particulier sur l'appui rive droite, par des reconnaissances géotechniques particulières et une étude de la stabilité de la culée* ». En effet, c'est à travers le scénario C qu'il est précisé qu'en cas d'augmentation de la pression hydrostatique sur l'ouvrage « *en l'état actuel des connaissances de l'ouvrage, la stabilité de la culée rive droite lors de crues exceptionnelles ne peut être totalement garanti. Les calculs de stabilité de la voute du barrage présentes en annexe se montrent rassurant sur ce point avec une stabilité assurée avec des coefficients de sécurité confortables même avec une cote de la retenue au niveau de la crête* ». C'est ainsi qu'il est proposé que « *des investigations doivent être menées au niveau de la culée et de l'appui rive droite pour statuer précisément que leur capacite à supporter une crue exceptionnelle. Ces investigations pourront consister en des carottages dans l'appui avec réalisation d'essais de résistances à la compression sur des échantillons afin de déterminer la qualité de l'appui et reconnaitre l'état de fissuration et des carottages dans la culée jusqu'au contact au rocher pour caractériser l'interface entre rocher et béton de barrage.* ». Dans le détail, l'étude de stabilité annexé à l'EDD (modèle aux éléments finis en matériau linéaire élastique isotrope, aussi bien pour le béton que pour la fondation) étudie uniquement la stabilité du massif de culée rive droite (et non le massif rocheux) sur la base de caractéristiques de cisaillement estimées à l'interface et précise qu'il est nécessaire de mobiliser de la cohésion à l'interface pour justifier la stabilité de la culée.

À la relecture de cette EDD, entre autres remarques, les services instructeurs s'interrogent logiquement sur la caractérisation du massif rocheux dont la qualification de « très bonne » dans les « fonctions techniques » ou « saine » dans les scénarios repose en réalité sur une incertitude assez importante : il n'y a pas de données factuelles. Il est alors appuyé la demande de réalisation d'investigations et d'essais associés à une étude de stabilité en rive droite. L'étude de stabilité devra prendre en compte l'ouvrage (culée rive droite) mais aussi la stabilité de la fondation (le massif rocheux).

Ainsi, 55 ans après la catastrophe de Malpasset et la conception du barrage de l'One, les caractéristiques du massif rocheux sous les culées commencent à être évoquées dans le processus d'analyse de risque.

Malheureusement, les carottages réalisés en conséquence par le Cerema en 2018 (cf. [11]) ne feront pas l'objet d'un relevé structural par vidéo, les carottes ne seront pas conservées et il ne sera réalisé que des essais d'eau de type lugeon ainsi que des essais en laboratoire de type essais à la compression, à la traction et pour déterminer la masse volumique ainsi que par vitesses des ondes de compression et de cisaillement pour le module. Une approche par l'indice RMR y indique un massif rocheux de classe IV (soit « rocher médiocre ») et le rocher au contact direct du béton est qualifié de « *qualité médiocre* » induisant « *qu'aucune cohésion ne peut être mobilisée* ». Il n'est pas réalisé d'étude structurale du massif, ni d'essai de cisaillement sur éprouvettes.

Ainsi, la mise à jour de l'EDD en 2021 en réponse aux remarques des services instructeurs, comprenant une nouvelle étude de stabilité basée sur le rapport d'investigation, conclut que *« L'analyse de scénarios de défaillance du barrage montre un risque particulier lié à la moindre qualité de la culée rive droite et des sollicitations particulières sur ces culées en période estivale. Ce risque a été classé comme « intolérable » ».*
En effet, sur la base du rapport de reconnaissance précité, en l'absence finalement d'étude structurale sur les massif rocheux et d'essai mécanique spécifique, prenant aussi compte de l'estimation qualitative à la baisse du massif de fondation et du contact de la culée, le réalisateur de l'EDD prend logiquement une position prudente :

- Pour la Fonction Technique 5 « *La culée rive droite reprend les efforts de la voûte* », en l'absence de cohésion « *la reprise de telles sollicitations est difficilement justifiable en l'état* » ;
- Pour la FT6 « *Les appuis reprennent les efforts induits par l'effet voûte du barrage*», selon l'analyse des données complémentaires « *il n'est pas possible actuellement de certifier que le massif rocheux reprendra les efforts sur le long terme* ».

Le scénario B voit alors évoluer sa probabilité vers une valeur « *P3 – événement probable entre 10^{-2} et 10^{-3}* », du fait principalement de l'évolution de la qualification de la fondation vers un « *matériau de qualité médiocre* », basé sur le rapport de reconnaissance. Les mêmes raisons font évoluer la probabilité du scénario C en P3.
En conséquence, l'EDD de conclure « *des mesures de réduction du risque sont donc à prendre […] La principale mesure de réduction du risque identifiée concerne le confortement des fondations des culées du barrage ou une reconfiguration de ce dernier en vue de se prémunir d'un risque de déstabilisation d'une culée qui provoquerait la rupture de la voûte.* ».
Ces éléments ont été transmis aux services instructeurs, mais avec un certain nombre de réserves de la part des gestionnaires, s'étonnant que près d'un demi-siècle après la construction de l'ouvrage et un fonctionnement sans défaut, une étude vienne indiquer que l'ouvrage présente un risque « intolérable » en situation courante (retenue vide en période estivale). Les services instructeurs ont alors requis de redéfinir les données d'entrées de l'EDD (étude hydrologique et de stabilité) qui sont prises en considération.

3. REPRISE DE L'ANALYSE DE STABILITE

3.1.Hypothèses - acquisition de données sur le massif rocheux

Une nouvelle étude de stabilité est confiée au bureau d'étude ISL début 2023. Les services RTM fournissent les hypothèses hydrologiques après prises en compte des remarques des services instructeurs. Les gestionnaires ont pris soin de demander à ISL une première phase d'analyse critique des études précédentes tout en veillant à fournir à ISL l'ensemble des données d'archives évoquées ci-avant qui permettent d'appréhender les hypothèses de modélisation qui s'avéreraient représentatives de la situation réelle de l'ouvrage. Au cours de cette phase, il est mis en évidence les points suivants :

- Il a été relevé dans le courrier du service RTM (cf.[2]) qu'il est mentionné que les opérations de clavage des plots ne seront pas réalisées car trop onéreuses. En effet, sous l'argument que l'étanchéité n'est pas recherchée, les concepteurs acceptent de perdre l'efficacité de la transmission des efforts aux berges. Un détail au sein d'un courrier, confirmé par les devis et plan de principe. Or, le non-clavage des plots n'a pas été pris en compte par les études précédentes ;
- La modélisation géométrique du contact entre la culée et sa fondation ne prenait pas en compte la réalité des redans ;
- Le gestionnaire rajoute la possibilité au bureau d'étude de bénéficier d'un marché de reconnaissance du massif rocheux afin d'acquérir des données factuelles sur sa résistance et ses modes de rupture possibles, demandant aussi d'inclure dans les études les vérifications issues du retour d'expérience de la catastrophe de Malpasset (coins de Londe).

La campagne de reconnaissance et de qualification du massif rocheux en rive droite est réalisée par la société Hydrogéotechnique SUD OUEST en juillet 2023, pilotée par ISL qui en a réalisé le cahier des charges sous les recommandations des gestionnaires. Les différents relevés des discontinuités par vidéo en forage sont complétés des levées à l'affleurement réalisées par ISL (cf. Figure 5). Des essais mécaniques sont réalisés sur les prélèvements, en particulier des essais sur joints.

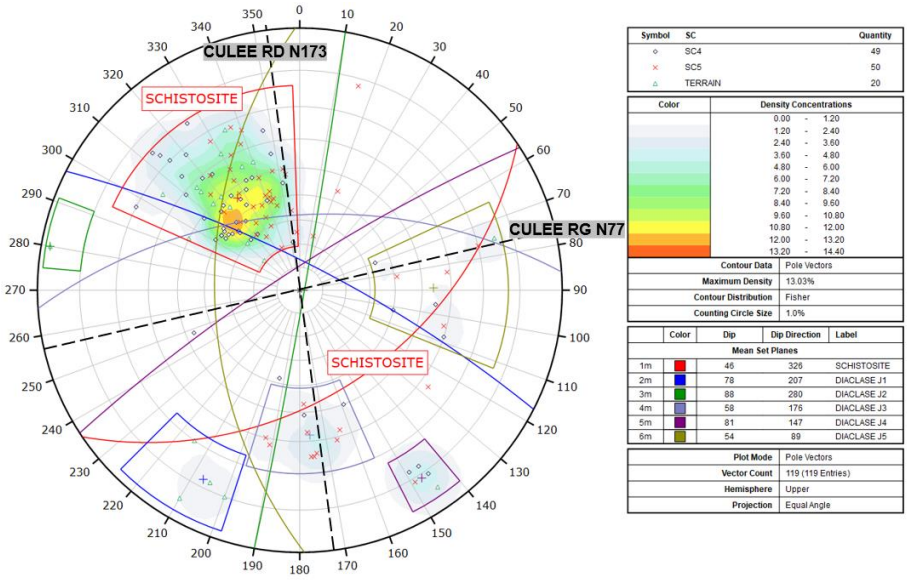

Figure 5 : Levés structuraux ISL ensemble du site + données OPTV (Canevas de Schmidt, hémisphère supérieur) – ISL - étude de stabilité du barrage voute de l'One (2023-2024)

Le rapport d'analyses des reconnaissances permet alors de fournir les hypothèses à considérer pour l'étude de stabilité relativement au massif rocheux d'appui. Ainsi, ISL propose donc (cf.[14]), se basant sur les résultats factuels, que « *Le massif schisteux constituant la fondation de la culée est globalement modérément à légèrement altéré (MW/SW) avec des passées décomprimées (faibles RQD). Il comporte de nombreux plans de schistosité, le plus souvent oxydés et ponctuellement ouverts (témoins de circulation d'eau), avec présence de stries (témoins hérités de l'activité tectonique régionale).* ». Préalablement aux résultats de la modélisation menée par ISL et permettant d'obtenir les efforts sollicitant la fondation, il est indiqué que « *Les nouvelles reconnaissances effectuées en 2023 confirment que les plans de schistosité peuvent constituer un plan de glissement potentiel sous la culée rive droite compte tenu de leur orientation et de leurs caractéristiques géomécaniques réduites. Les*

études de stabilité doivent tenir compte de cette famille de discontinuités dans l'analyse des conditions d'appui en rive droite. La stabilité est donc en grande partie régie par les caractéristiques mécaniques de ces discontinuités naturelles : un plan de glissement pourrait se créer à quelques mètres sous les redans de la culée selon la schistosité. Néanmoins, le déplacement de la culée et d'une partie de sa fondation nécessiterait également une rupture de la masse rocheuse sur les parties basses et latérales de la zone de glissement ».

Il est fourni en conclusion un modèle géomécanique du massif rocheux, présentant d'une part des caractéristiques relatives au plan de discontinuité principale (la schistosité), et d'autre part les caractéristiques de la matrice rocheuse. Les caractéristiques de cisaillement sur joints sont fournies en fourchette de valeur. Au regard de cette caractérisation, il est fait le choix par ISL de proposer en modélisation deux plans préférentiels (cf. Figure 6) qui reprendront respectivement le plan moyen d'appui de la fondation (pendage à 29°) et le « plan de glissement » mentionnés plus haut (40°). Chaque plan se verra affecté des caractéristiques mécaniques issues de l'interprétation des essais.

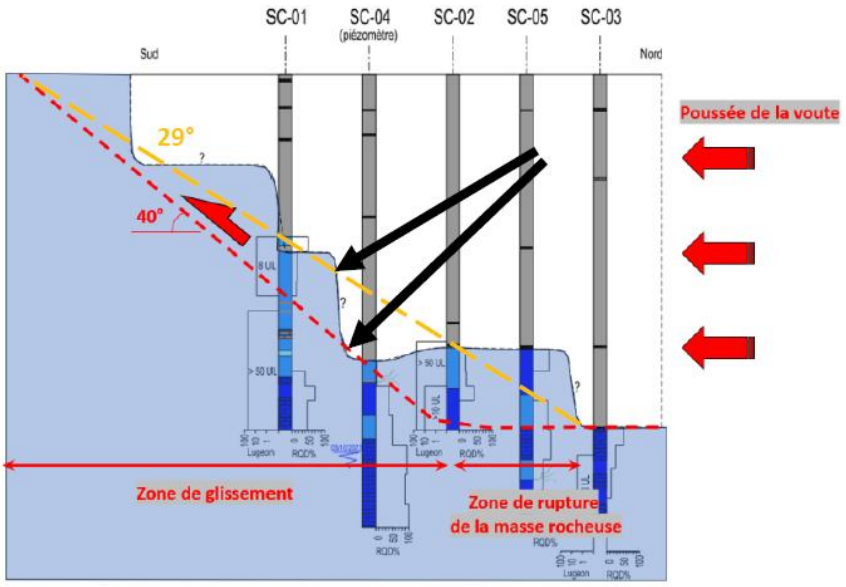

Figure 6 : Définition des 2 plans de modélisation rive droite (en jaune le contact culée/fondation, en rouge le « plan de glissement » potentiel) - – ISL - étude de stabilité du barrage voute de l'One (2023-2024)

3.2.Reprise de calculs et premières conclusions

Sur la base de ces hypothèses relatives au massif rocheux, une modélisation EF a été réalisée par ISL (calage issue des résultats de l'instrumentation). Les matériaux sont modélisés en élastique linéaire, des plans d'interface (lois de Mohr-Coulomb et possibilité de décollement) modélisent les contacts (joints ouvert, interface fondation) et discontinuités. Les premiers résultats de calcul pour les situations réglementaires montrent que l'appui rive droite présente des marges de sécurité importantes, quelle que soit la situation de calcul. Le « plan de glissement » potentiel identifié reste stable, quelles que soient les sollicitations. Et ceci avec des facteurs de sécurité relativement confortables (supérieurs à 2). Sur les aspects de stabilité du massif d'appui, l'étude est complétée par une approche analytique de type « coin de Londe » prenant en entrée les sollicitations issues du calcul EF et recherchant les compartiments cinématiquement admissibles. Pour ces études aussi, les facteurs de sécurité apparaissent acceptables.

Il s'avère que c'est principalement l'hypothèse de joints du barrage non clavés et ouverts après retrait initial, qui minimise fortement l'effet voute de l'ouvrage (l'ouvrage travaillant alors plutôt en flexion sous la poussée) et sollicitant ainsi faiblement les culées, permettant ces coefficients de sécurité confortables pour la stabilité de la culée rive droite. Ce résultat reste suspendu à l'hypothèse prise pour l'ouverture initiale des joints : des joints moins ouverts initialement auront bien évidemment pour résultat de solliciter de manière plus importante les appuis.

ISL a donc complété son calcul par une étude de sensibilité (valeurs initiales de retrait du béton, température initiale de l'ouvrage), qui a amené les constats suivants relativement à la stabilité en rive droite :

- La seule situation où le facteur de sécurité atteint 1 (comprenant le coefficient de sécurité partiel de 1,5) est la situation « normale : RN – envasement courant – été décennal » ;
- Pour cette situation, il n'y a pas de glissement d'ensemble sur le plan de schistosité (facteur de sécurité de 1,3) ; le glissement critique reste sur le plan passant par les redans.

La modélisation (cf. Figure 7) montre que le glissement prévu ne dépasse pas 1,7 mm en pic ponctuel. La culée retrouve un nouvel équilibre à la suite de ce glissement, après le relâchement d'une partie de la poussée d'origine thermique de la situation.

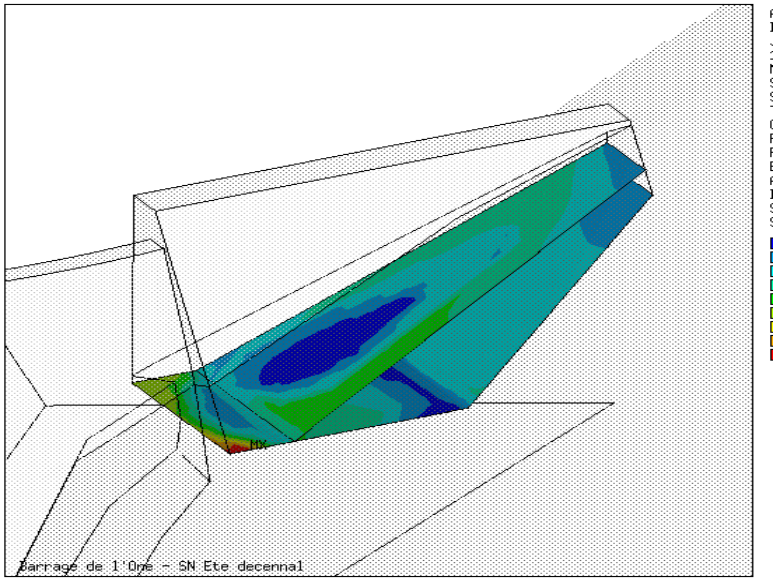

Figure 7 : étude de sensibilité sur l'ouverture des joints, déplacement à l'interface culée/fondation pour le cas critique ISL - étude de stabilité du barrage voute de l'One (2023-2024)

En regard des recommandations du CFBR (cf.[13], §6.2.2), ce « glissement » a été jugé comme acceptable par ISL. Néanmoins, l'hypothèse centrale de cette conclusion favorable (ouverture initiale des joints entre plots) reste à confirmer et ISL recommande logiquement d'ausculter les joints afin de permettre de connaître leur état d'ouverture réel et leur variation. Ce sont ces calculs et ces préconisations qui seront soumis aux services instructeurs en vue de décider de l'avenir du barrage de l'One.

Il en ressort néanmoins que le fonctionnement du barrage de l'One est atypique pour un barrage voûte : ce qui peut apparaître comme un défaut initial (non-clavage des joints), s'il est confirmé par l'auscultation, s'avère au final une réserve heureuse pour le dimensionnement de l'ouvrage et la stabilité de la culée.

4. REFLEXIONS ET PERSPECTIVES

Cette nouvelle étude de stabilité et ses conclusions ont été partagées récemment aux services instructeurs en novembre 2024. Elle recommande de moderniser le suivi de l'auscultation, de mettre en place une télétransmission des données connectée aux dispositifs existants et une auscultation du joint entre la culée en rive droite et la voûte en équipant le joint en fissuromètres. Les conclusions et préconisations de l'étude ont reçu un accueil satisfaisant des services instructeurs dans leur globalité. Les gestionnaires du barrage de l'One se sont engagés auprès des services à renforcer courant 2025 l'instrumentation en étudiant la faisabilité d'instrumentation du barrage comme précisé ci-avant.

En termes de projection sur l'étude de danger, on peut donc s'attendre à ce que les fonctions techniques liées à la résistance du massif rocheux et à son interface soient revues à la hausse et qu'en parallèle les sollicitations soient abaissées. Ceci conduirait à abaisser le seuil de probabilité de survenance de défaut lié à la résistance du massif d'appui rocheux pour les scénarios où ce point est concerné. Les conséquences sur les mesures du risque sont non négligeables : de renforcement en fondation d'un massif rocheux ou un écrêtage du barrage, il est proposé une auscultation renforcée afin de fiabiliser le modèle de comportement. Cette modification d'ampleur est en lien direct avec une diminution d'incertitude liée à la simple acquisition de données.

L'exposé de cette expérience proposée par la réalisation de l'étude de danger de l'ouvrage jusqu'à ce stade nous amène à exprimer les réflexions suivantes :

- Les démarches de conception ainsi que les notions de sûreté et de fiabilité des ouvrages ont connu des avancées significatives suite à la catastrophe de Malpasset, sur plusieurs domaines et notamment sur celui de la mécanique des roches. Avec d'autres expériences malheureuses, le domaine de la mécanique des roches a depuis un certain temps compris que le comportement d'un massif reposait aussi bien sur sa matrice continue que sur ses discontinuités (cf.[8]). Cette caractérisation ne peut se contenter d'estimation qualitative pour un grand barrage. Ceci nécessite a minima une analyse structurale associée à des investigations et essais mécaniques spécifiques conduisant à une qualification quantitative du matériaux rocheux. Les raisons qui font que ces considérations aient mis plus de 50 ans à émerger sur le barrage de l'One sont à interroger. Nous émettons l'hypothèse que ces raisons sont plutôt collectives et méthodologiques : l'évidence du sujet semble s'être diluée dans la multiplicité des acteurs et des procédures.
- Un modèle de calcul est une image de la compréhension du fonctionnement qu'en ont les ingénieurs : la qualité repose en grande partie sur la qualité des données introduites (données mécaniques, données d'archives pour le dossier d'ouvrage, etc.). En particulier, on constate ici toute l'importance d'un dossier d'ouvrage bien documenté, permettant de fiabiliser des hypothèses de base et de comprendre le fonctionnement d'un ouvrage. C'est à la suite d'une lecture attentive du dossier d'ouvrage que l'on a pu considérer comme réaliste de modéliser le non-clavage de joints. L'auscultation permettra de valider ou d'infirmer le modèle : si le comportement réel s'écarte du modèle, c'est le modèle qui est faux (ou ses hypothèses), pas la réalité. Cette évidence est parfois oubliée, mais nous permet d'insister sur l'importance de l'acquisition de données fiables et de leur analyse critique pour un modèle pertinent. La fiabilité de l'analyse de risque dépend directement de la qualité des données acquises pour le modèle ;
- Dans une analyse de risque, une incertitude conduit préférentiellement à considérer un danger lorsqu'on se place du côté de la sécurité, par principe de précaution. Et ce d'autant plus quand l'accidentologie de cas similaires (Malpasset) ou le retour d'expérience (Castel-Vieil) tend à conforter cette logique. Le traitement de façon prioritaire des scénarios fortement critiques mis en évidence dans l'EDD peut conduire à reléguer au second plan d'autres problématiques d'une gravité moindre mais plus probables, ou bien occulter des sujets plus concrets, comme ici le non-clavage des joints. Ainsi, dans des cas où l'incertitude conduit à maximiser les risques, sa réduction devrait être automatiquement recherchée.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Sannac, Ingénieur principal des travaux des Eaux et Forêts. Rapport d'Avant-Projet de construction d'un barrage de sédimentation sur le torrent de l'One - 21 janvier 1958.

[2] Sannac, Haute-Garonne – Restauration des terrains de montagne. Proposition de « dépense d'Equipement » à imputer sur l'exercice 1960. 27 Janvier 1960.

[3] Langlois, Directeur adjoint de l'équipement, Chef du Service des Etudes et projets hydroéléctriques. Barrage-voûte de l'One. 04 Mai 1960.

[4] Bellan. Ingénieur principal des eaux et forêts, chef du service RTM à Toulouse. Courrier à Messines – Etude géologique du site d'implantation du barrage de l'One à Luchon. 31 Mai 1960.

[5] Etudes&Travaux de fondations – Rapport de sondages – Barrage de l'One près de Luchon – 04 Octobre 1960.

[6] Perret (reproduit par Bellan). Note pour monsieur l'ingénieur en Chef (Perret), Société Nationale des Chemins de fer Français- Projet du barrage de sédimentation de l'One. 24 Novembre 1960.

[7] Cemagref. Barrage de l'One à Bagnères de Luchon (31). Rapport de visite du 25 avril 1989. Septembre 1989.

[8] CFMR. Manuel de Mécanique des Roches – Tome 2 : les applications. Les Presses de l'Ecole de Mines de Paris. 2004.

[9] Bordes, J.-L. 2010. Les barrages en France du XVIIIème à la fin du XXème siècle en France, histoire, évolution technique et transmission du savoir. Pour Mémoire 9:70–120.

[10] CACG / DDTM31-RTM – Barrage de l'One. Etude de Dangers. Mars 2015.

[11] Cerema. 2019. Barrages de l'One – Analyse géotechnique pour la culée C1.

[12] RTM 31. Etude de Bassins de Risques – Rivière et barrage de l'One – Série RTM de l'One. 2020.

[13] CFBR - Recommandations pour la justification du comportement des barrages-voûtes. Janvier 2021.

[14] ISL – étude de stabilité du barrage voute de l'One / note d'analyse des reconnaissances géotechniques. 01/2024