

# Evaluation et justifications géotechniques d'ouvrages existants de protection contre les risques naturels

## Geotechnical evaluation and justification of existing structures for protection against natural hazards

Jérôme PALISSE<sup>1\*</sup>, Rémy MARTIN<sup>1</sup>, Yann QUEFFELEAN<sup>2</sup>

*1 ONF/DNRN-pole RTM,, Grenoble, France*

*2 ONF/DNRN-pole RTM,, Gap, France*

*[\\*jerome.palisse@onf.fr](mailto:jerome.palisse@onf.fr)*

**RESUME :** Depuis approximativement la moitié du XIX<sup>ÈME</sup> siècle, les services de Restauration de Terrains de Montagne (RTM) ont bâti et entretenu pour le compte de l'Etat un nombre important d'Ouvrages de Protection contre les Risques Naturels (OPRN) – aujourd'hui gérés par les services RTM au sein de l'ONF, approximativement 20 000 ouvrages dédiés pour la plupart à la correction torrentielle. Le RTM agit aussi aujourd'hui comme Maître d'Œuvre pour les collectivités dans ce domaine. Ces ouvrages peuvent être placés majoritairement dans la typologie des ouvrages « géotechniques » pour des ouvrages de génie-civil et dont la vocation première est d'être des mesures structurelles de réduction d'un aléa « gravitaire » (avalanche, crue torrentielle, mouvement de terrain).

Dans la période actuelle, les gestionnaires se trouvent confrontés à plusieurs problématiques du fait que le dimensionnement fonctionnel date de l'époque de création des OPRN :

- L'appréciation du risque évolue : évolution de l'aléa, des connaissances mais également de la société (augmentation des enjeux, risque acceptable, ...) - ce qui implique de réinterroger les choix initiaux de stratégie de gestion du risque reposant sur l'ouvrage tout en intégrant le fonctionnement passé et les évolutions probables (des enjeux notamment) dans l'analyse de la stabilité des ouvrages ;
- Le corpus technique français actuel de dimensionnement d'ouvrage (Eurocodes 7) est peu développé sur l'évaluation de la performance d'ouvrages existants via des méthodes simplifiées, qui plus est pour le domaine des OPRN. La stricte application des règlements destinés aux ouvrages à construire pour évaluer un ouvrage existant n'est pas toujours pertinente et nécessite des adaptations ;

Le présent article propose au travers de plusieurs cas d'études de décrire ces problématiques, les solutions avancées et les possibilités actuelles offertes dans le domaine de la justification de dimensionnement géotechnique d'OPRN existants anciens en vue d'optimiser la gestion du parc.

**ABSTRACT:** Since approximately the mid-19th century, the Restoration of Mountainous Areas (RTM) services have built and maintained a significant number of Natural Hazard Protection Structures (OPRN) on behalf of the State – now managed by the RTM services within the National Forestry Office (ONF) – approximately 20,000 structures, most of which are dedicated to torrent control. The RTM also acts as a designer for local authorities in this area. These structures can be classified primarily as "geotechnical" civil engineering works, whose main purpose is to provide structural measures for reducing "gravity-related" hazards (avalanches, flash floods, landslides).

In the current period, managers face several challenges due to the fact that functional sizing dates back to the creation of OPRN :

- Risk assessment is evolving: changes in hazard, knowledge, and society (increased stakes, acceptable risk, etc.) – which implies re-examining initial risk management strategy choices based on the structure, while integrating past performance and probable changes (particularly in stakes) into the analysis of structural stability;
- The current French technical framework for structural design (Eurocode 7) is underdeveloped in its simplified methods for evaluating the performance of existing structures, especially in the OPRN domain. Strictly applying regulations intended for new construction to evaluate existing structures is not always appropriate and requires adaptation.

This article uses several case studies to describe these problems, the solutions proposed, and the current possibilities offered in the field of geotechnical design for OPRN with a view to optimizing the management of the infrastructure.

**Mots-clés:** Crue torrentielle ; RTM ; Ouvrage de protection ; justification d'ouvrage existant.

## 1 CONTEXTUALISATION

Les activités et évolutions de la RTM et des services associés sont connues, documentées et analysées pour une amélioration continue mais restreintes aux milieux des spécialistes des domaines associés : les phénomènes naturels de montagne, la gestion intégrée des risques naturels, en particulier la correction torrentielle (Carladous et al. 2016, Piton et al. 2019).

Si l'histoire de la RTM, les différentes phases ainsi que les évolutions de contextes (modifications des aléas naturels, modifications des enjeux, modification des connaissances des phénomènes) sont déjà discutées, les relations de l'activité avec le domaine de l'évaluation et de la justification structural d'OPRN existant ont été peu décrites bien que connues en théorie (Carladous et Chitry, 2022). L'exposé d'exemples récents aboutit aujourd'hui à un certain nombre d'enseignements pour la relation entre un gestionnaire et la profession de géotechnicien qui officie en priorité sur la justification de ces ouvrages.

La majorité de la politique d'acquisition RTM de l'Etat et de construction d'ouvrages de génie-civil intégrés à des systèmes de protection s'est réalisée durant trois périodes successives que l'on peut qualifier de „RTM historique“: la période de „tests“ (1860-1882), „l'âge d'or“ (1882-1914), le temps de la „maintenance“ (1914-1940). La seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle a plutôt été marquée par un „déclin“ (1940-1980), puis par une „refondation“ des services RTM (depuis 1980) qui se sont alors tournés vers une gestion des dispositifs historiques et vers la spécialisation sur la connaissance des aléas, avec un contingent majoritaire de spécialistes en hydraulique torrentielle.

C'est majoritairement durant la période 1860-1940 que les grands ouvrages de génie-civil à l'échelle de bassins versants ont été mis en oeuvre, ouvrages que doivent gérer aujourd'hui les services RTM. L'enquête nationale « Messines » de 1964 comptabilise alors en forêts domaniales françaises approximativement 92 873 barrages et seuils de correction torrentielle (Piton et al. 2019). Aujourd'hui, la base de données RTM partie ouvrage (BD-RTM : <https://geo-onf.opendata.arcgis.com/>) comptabilise approximativement 20 000 ouvrages, pour une bonne partie construits à cette période historique. Entre ceux-ci et les plus récents, l'approche de dimensionnement a pu évoluer sur la base de l'approche historique d'alors constituée par le couple observation/correction. Aujourd'hui sont clairement identifiés le dimensionnement fonctionnel (la taille, le rôle sur les phénomènes,...) et le dimensionnement

structural (résistance de l'ouvrages aux contraintes subies).

Les praticiens de la période historique projetaient leur ouvrages principalement sur des fonctions diverses en vue de la correction (Piton et al. 2019), les notions de stabilité structurale, de fiabilité et de durabilité d'ouvrages qui n'étaient pas exprimés en ces termes restaient limités aux connaissances et techniques d'époque. On bâtissait souvent l'ouvrage jusqu'au niveau de la dernière crue atteinte ou pour un objectif de pente d'atterrissement et pour une durée de vie la plus longue possible - voire pour « abandonner » l'ouvrage alors enterré par les atterrissements successifs et en construire un nouveau par-dessus. L'enchaînement entre dimensionnement fonctionnel et dimensionnement structural pour une durée de vie donnée n'existait pas encore, de même que la notion d'aléa (au sens de probabilité d'occurrence). Du point de vue du dimensionnement structural, les approches calculatoires développées alors (Thiéry 1896, Bernard 1927) étaient communes aux autres domaines de la construction en génie-civil (principe de la statique, loi de Coulomb, recherche des épures des centres de pression, etc...). Sur l'aspect mécanique des sols, il était privilégié une approche conservatrice sur les caractéristiques de résistance des sols et des matériaux constitutifs d'ouvrage du fait de l'absence de moyens d'investigation et de concepts encore non aboutis en mécanique des sols et des roches. A titre d'exemple, le cours de restauration des terrains en montagne de Bernard en 1927 propose *„lorsque le sol sur lequel repose l'ouvrage n'est pas rocheux, et ce sera le cas général, la pression maximum ne devra pas atteindre celle qui correspond à la maçonnerie. Il sera prudent de ne pas dépasser 4 à 5 kilogrammes par centimètre carré. Ce sera par exemple le cas d'ouvrages fondés sur des atterrissements.“* Par conséquent, on construisait des ouvrages robustes, résilients, souvent volontairement surdimensionnés.

Faisant suite à la période historique, la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle a vu l'avènement et l'essor de la géotechnique „technologique“ : moyens d'investigations, d'essais de caractérisation, développements théoriques et calculatoires associés en mécanique des sols et des roches, développement numérique, pour la plupart adaptés à des conditions de site qui ne sont pas celles d'un lit de torrent ou d'un versant de montagne (Bordes, 2000). Pour autant, c'est plutôt sur le domaine de la connaissance des phénomènes que le RTM a développé son ingénierie en période récente (cf. Carladous et al., 2016). Les services RTM ont moins investis le domaine de la géotechnique et ses sciences associées. C'est plutôt l'inverse qui s'est produit : la profession des

géotechniciens alors organisée et expansive s'est tournée vers la qualification des aléas, sujet en développement. On peut citer les études d'aléa rocheux qui s'appuient volontairement sur la NF P 94-500, en proposant par exemple outils et prestations associées (projet C2ROP <https://c2rop.fr/>, Martin et al., 2021).

Depuis 2018, les services RTM déploient des „Etudes de Bassins de Risques“ (EBR). Ces rapports ont pour objectif d'établir une priorisation des actions à mener à l'échelle du bassin de risques où sont situées les domaniales RTM. C'est la mise en oeuvre stratégique de la politique RTM de l'Etat permettant une gestion patrimoniale. On retrouve ici un système de gestion classique d'un parc d'ouvrages permettant une programmation de travaux. Les clés de priorisations d'actions sont en premier lieu le niveau d'enjeux résultants dans le bassin de risque puis le niveau d'urgence pour la stabilité structurale à venir : l'état structural des ouvrages est bien un critère crucial pour la gestion du parc d'OPRN.

En résumant, on constate que la majorité des principes de conception et de réalisation de grands systèmes de protection contre les risques naturels intégrant des OPRN - encore effectifs aujourd'hui - s'est faite préalablement au développement de la géotechnique moderne et de ses outils technologiques contemporains, règles de l'art associées (normes, recommandations...). Les gestionnaires évaluent cependant en continu la performance des systèmes vis-à-vis de l'objectif et gèrent selon les moyens disponibles. Ce travail est différent d'une analyse de risque centrée sur les conséquences de la défaillance d'un ouvrage du système. Il s'apparente après

l'accumulation d'expériences à un dimensionnement par mesures prescriptives. L'application stricto-sensu des règles actuelles de conception ne permet pas, dans un certain nombre de cas, de justifier les ouvrages existants quand bien même ces derniers montrent un vécu satisfaisant ce qui pose un réel souci dans la gestion des ouvrages et leur maintenance.

## 2 CAS D'ETUDES

### 2.1 Le dispositif du ravin de la Combe, les Mées (04)

Le village des Mées s'est développé en limite du lit majeur de la Durance, sur le cône de déjection du ravin de la Combe et au pied des affleurements rocheux des Pénitents. A l'apex immédiat du cône et du village existe un dispositif de gestion des phénomènes torrentiels initié dès le XVIII<sup>ème</sup> siècle.

Ce dispositif (cf. Figure 1) est constitué actuellement d'un barrage de sédimentation destiné à stocker les matériaux charriés par le torrent (approximativement ~75m de long à la crête, 5m d'élévation au plus haut, mur poids en maçonnerie), puis d'un ouvrage de déviation (~3m50 de haut, ~80m de long à la crête, mur poids en maçonnerie avec recharge aval en terre) menant à un tunnel creusé sous le massif des Pénitents (section ~3x3m, ~300m de long).

Dans le cadre de la régularisation des dispositifs de protections contre les inondations, l'utilité de ce dispositif a été logiquement interrogé par les services de l'Etat, de même que le portage de la maîtrise d'ouvrage. Il s'avère que le dispositif était sous les

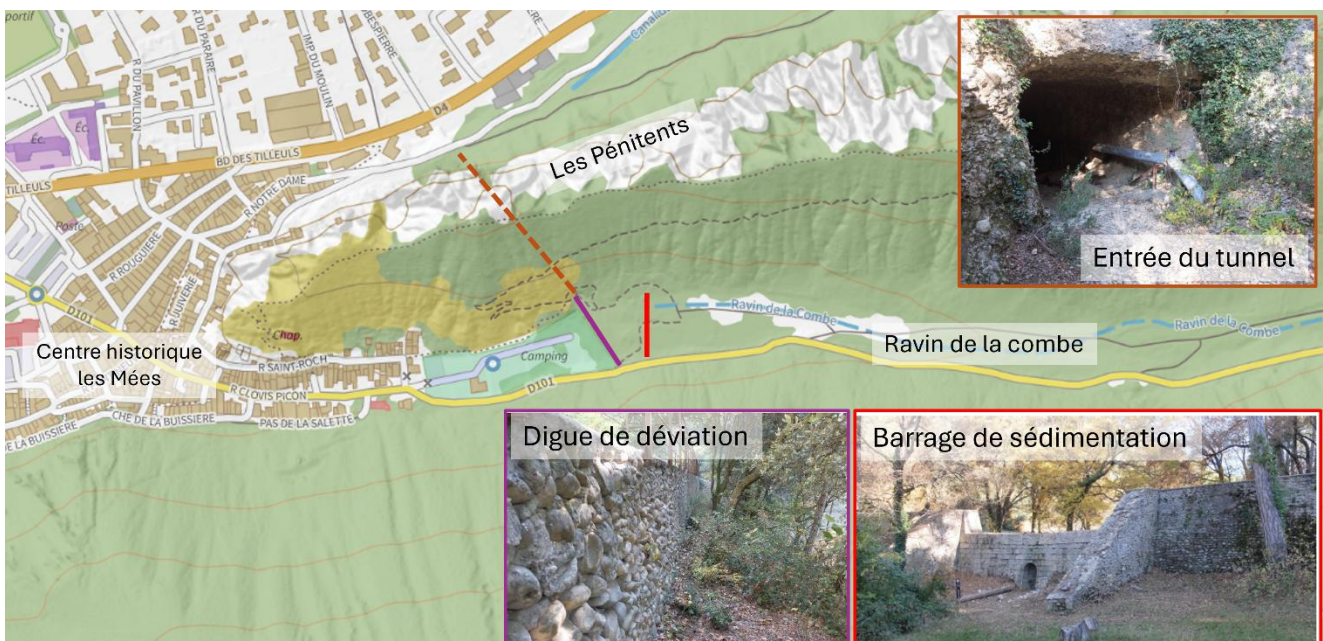


Figure 1 : Dispositif du Ravin de la Combe (fond Géoportail - IGN)

seuils de la réglementation en cours sur les ouvrages hydrauliques. Ainsi, il n'existe pas de cadre formel pour évaluer et justifier la pertinence de l'ouvrage.

Le Service RTM 04 a donc initié une EBR (RTM04, 2023) : l'étude historique permet de retracer l'édification du dispositif, commencé en 1778 par une première version de l'ouvrage de déviation qui barrait entièrement le lit du torrent (qui passait auparavant dans le village), renvoyant les eaux vers le tunnel qui fut achevé d'être creusé en 1784. Un peu moins d'un siècle plus tard en 1875, un événement dépassa en partie l'ouvrage de déviation alors que le reste de la crue s'engouffrait dans le tunnel créant des dommages à l'aval. C'est à la suite que la commune demanda la création d'un périmètre de reboisement à l'Etat et que la série des Mées fut créée en 1876. Le système de protection alors créé contenait la correction active par boisement du bassin versant ainsi que le barrage de sédimentation qui fut créé en 1878 avec une réhausse de l'ouvrage aval (illustration de la logique observation/correction). Depuis, il semble que le dispositif n'ait pas subi de crue et que la cote du sommet de l'ouvrage de déviation n'ait jamais été dépassée.

Après un diagnostic hydraulique du bassin versant (intégrant une approche des débits caractéristiques liquides et solides pour différentes périodes de retour), il apparaissait nécessaire d'obtenir un état structural des ouvrages et de leur niveau de résistance et fiabilité. Une première mission de diagnostic de type G5 selon la NF P 94-500 a été confiée à un prestataire extérieur en imaginant que les termes de la norme seraient suffisants pour réaliser un „recalcul“ afin de déterminer l'état de stabilité des deux ouvrages poids. Si le modèle géotechnique proposé à la suite des investigations reste cohérent, la tentative de recalcul se heurtait à des incompréhensions majeures sur le fonctionnement des ouvrages, leur principe de modélisation et les situations de calcul à envisager, conduisant à une impasse – probablement dû au manque de spécifications et de description du besoin de la part du gestionnaire. Dans une première version de calcul, le prestataire envisageait entre autres l'ouvrage de déviation comme une digue « en terre » et ne le calculait qu'en stabilité générale en rupture circulaire, aux coefficients partiels sur une situation de surverse avec suppression de la recharge aval (cf. Figure 2). Les paramètres de cisaillement avaient été préalablement „calés“ sur un „calcul en retour“ aux coefficients partiels unitaires.

Le service RTM a finalement choisi de re-intégrer le „recalcul“ en définissant les situations et les modèles de calculs adaptés aux ouvrages. Les

ouvrages ne présentant pas de pathologie spécifique (outre des dégradations superficielles dues à leur âge), les investigations ne montrant pas de « sujet » géotechnique ignoré à la réalisation, une adaptation des principes de calcul actuels montre qu'il est possible de justifier les ouvrages pour un chargement jusqu'à une revanche sous leur crête avec des coefficients de sécurité acceptable.

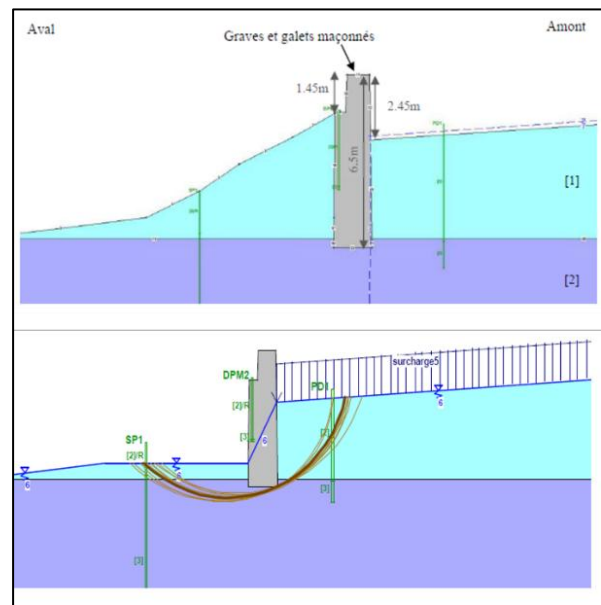


Figure 2 : ouvrage de déviation des Mées - modèle et calcul de stabilité initialement proposé

Ce niveau de chargement correspond au dimensionnement fonctionnel entériné par la maîtrise d'ouvrage lors de la construction du dispositif. Si les études actuelles d'aléa montrent qu'il est possible de trouver une situation où cette surverse est possible (embâcles, etc...), cela n'induit pas que l'ouvrage a été mal dimensionné du point de vue structural mais plutôt que cette situation est au-delà du compromis initialement accepté par le maître d'ouvrage comme niveau de protection.

Pour conclure sur cet exemple on peut aussi intégrer l'historique de l'ouvrage qui n'a pas été dépassé fonctionnellement sur 147 ans d'existence. Selon les approches statistiques actuelles, la probabilité d'avoir observé sur une période de 147 ans un phénomène de période de retour 100 ans est de 0,77. On peut compléter en indiquant qu'il faut envisager le système de protection dans sa globalité : la correction active par boisement a pu se mettre en place depuis 147 ans, expliquant en partie la non-occurrence du phénomène centennal dans une approche stationnaire (ie il ne tient pas compte du reboisement, voire des évolutions climatiques). Les ouvrages pourraient aujourd'hui contribuer à un

niveau de protection bien supérieur. Enfin, dans un contexte d'accroissement de feux de forêt pouvant mettre à mal le couvert forestier à l'échelle du bassin versant et favoriser les phénomènes de crue, le maintien en bon état de fonctionnement de ce dispositif structurel paraît nécessaire.

## 2.2 Le grand barrage de l'One, Bagnères-de-Luchon (31)

Cet exemple est issu du cas d'un barrage torrentiel classé B au titre de l'article R2141-112 du CE. Une étude de stabilité a été engagée pour l'étude de danger (EDD) réglementaire (Palisse et al., 2025).

L'EBR de la série RTM de l'One (RTM31, 2020) nous apprend que du milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle jusqu'au milieu du XX<sup>ème</sup>, 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 2 importants ouvrages d'atterrissement sur ces cours d'eau (le barrage de l'One et celui de Castel-Vieil). Conçus à une époque où les barrages voûtes béton représentaient une tendance et une innovation technologique, ce choix a été proposé, clairement atypique encore aujourd'hui dans le domaine de la correction torrentielle.



Figure 3 : le barrage de l'One

Ainsi, le barrage de l'One (Figure 3) est un barrage voûte béton de 25 m de haut et de 55m de large en crête, imaginé construit dans les années 60, fondé sur des schistes carburés. Son dimensionnement fonctionnel visait l'objectif de créer une rétention de 350 000m<sup>3</sup> de matériaux par atterrissement successifs sur une période de 28 années. Ce choix de dispositif s'explique notamment par l'impossibilité pour l'Etat

d'acquérir les terrains à l'amont sur le bassin versant et de procéder à une correction active – la mesure consistait donc en des ouvrages de rétention de grande capacité.

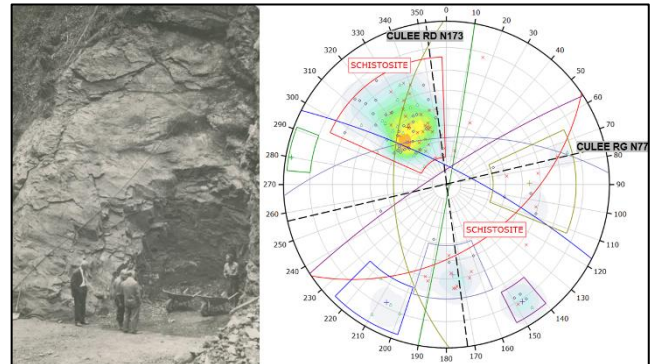


Figure 4 : culée RD à l'ouverture des fouilles (1960) et levés structuraux sur canevas de Schmidt (2023)

Une première EDD a été réalisée en 2015 sur le barrage de l'One, puis mise à jour en 2021. Dès l'initiation du classement de l'ouvrage dans les années 90, les culées d'appui sur massif rocheux interrogeaient les services instructeurs : l'ouvrage a été conçu et édifié dans la période contemporaine de la catastrophe de Malpasset, sans avoir pu bénéficier de tous les enseignements associés en mécanique des roches. Ainsi, une première étude de stabilité a été réalisée par un bureau d'étude agréé avec une modélisation par éléments finis s'appuyant notamment sur des investigations géotechniques – malheureusement trop partielles. Les conclusions de cette étude ont mis en doute la stabilité de la culée en rive droite pour des situations courantes (i.e. en-dehors de situation de crue), ce qui posait question puisque l'ouvrage était en place depuis plus de 50 ans, en ayant subi des crues jusqu'à déversement, avec un comportement satisfaisant.

Manifestement, les données et les principes de modélisation présentaient quelques lacunes et il a été entrepris de reprendre la justification de stabilité de l'ouvrage. Il a été réalisé un recueil de données factuelles sur les massifs d'appui (carottage avec prélèvement d'échantillons pour essais en laboratoire de cisaillement sur joints, OPTV,...) ainsi qu'un parcours attentif des archives de l'ouvrage. Grâce à l'acquisition de ces données ainsi qu'à une prise en compte des aspects atypiques pour un ouvrage voûte (plots de bétonnage non jointés), il a été possible de montrer que les conclusions de la première étude de stabilité étaient pessimistes et que l'ouvrage présentait des marges suffisantes de stabilité...pour retenir de l'eau.

Cette étude de stabilité a permis notamment de s'intéresser à un aspect de dimensionnement d'appuis

rocheux d'un barrage voûte qui n'avait pas été spécifiquement étudié à la création, faute de connaissance et de moyens spécifiques existants à l'époque (Figure 4) – c'est un des aspects bénéfique d'une reprise d'évaluation et de justification d'un OPRN existant : un élément d'intégrité structural qui n'avait pas été envisagé à l'époque. Toutefois, cet exemple soulève aussi un certains nombre de points qui font envisager que le formalisme des EDD réglementaires ne traite pas certains sujets important pour le gestionnaire de l'OPRN.

Les EDD se focalisent sur le danger que peut présenter l'ouvrage à libérer son volume d'eau issue de crue liquide de manière incontrôlée, quand bien même sa fonction principale est de retenir la crue solide. L'ensemble de la démarche d'EDD se focalise sur cet aléa, mais n'investigue pas en vis-à-vis la protection que l'ouvrage offre vis-à-vis de l'aléa à l'origine de son dimensionnement fonctionnel. Curer l'ouvrage présente un coût certain et le gestionnaire se pose la question de laisser le barrage s'atterrir comme c'était l'objectif initialement. Ceci aboutit à une forme de paradoxe : lorsque l'ouvrage sera atterri, il n'y aura plus d'exigences de suivi de sûreté puisque le danger lié à la retenue d'eau sera nulle. Pour autant, lorsqu'il sera atterri, sa capacité de rétention aux crues solides sera annulé, maximisant le risque pour les enjeux à l'aval vis-à-vis de la crue solide.

Ainsi, si l'EDD fournit des éléments appréciables pour un aspect structural spécifique (appui rocheux), elle ne permet pas dans ce cas précis d'aboutir à une analyse comparée entre le niveau de protection offert face à l'aléa principal (crue torrentielle) et le sur-aléa induit par la présence de l'ouvrage (inondation). C'est en substance la problématique que les gestionnaires

ont eu pour l'ouvrage de Castel-Vieil sur la Pique à l'amont de Bagnère-de-Luchon. Ce dernier a été écrêté de 5m en 2015 et totalement atterri, mais nécessite d'imaginer le rétablissement du niveau de protection aux crues torrentielles par un autre dispositif.

### 2.3 Le dispositif du Bourgeat, les Houches (74)

A l'apex du cône de déjection du torrent du Bourgeat, sur la commune des Houches en Haute-Savoie, un dispositif paravalanche a été construit entre 1996 et 1998 sous maîtrise d'ouvrage de la collectivité avec le service RTM 74 comme maître d'œuvre travaux. Ce dispositif spécifique a été conçu initialement pour assurer une double fonction : protection contre les avalanches et protection contre les crues torrentielles. Sur l'aspect avalancheux, ce dispositif était majoritairement constitué d'ouvrages en terre ou digue (cf. Figure 5), de travaux de terrassement et de profilage permettant de faire déborder les avalanches en rive droite du torrent à l'amont du cône de déjection, freiner l'écoulement jusqu'à son arrêt puis permettre le stockage.

En 2018 ce dispositif a été sollicité, dépassant ponctuellement la digue aval (sans entamer la stabilité de l'ouvrage). Un autre événement en 2021 avec un aérosol remarqué ont conduit l'Etat au travers de la DDT à demander une confirmation de l'aléa PPR au RTM 74. Ce dernier, par une étude d'aléa a proposé une extension de l'aérosol centennal conduisant à retenir un aléa plus important que dans le PPR approuvé. Le Maître d'Ouvrage a alors demandé un diagnostic d'ouvrage au service RTM ainsi que l'établissement d'un projet d'amélioration du

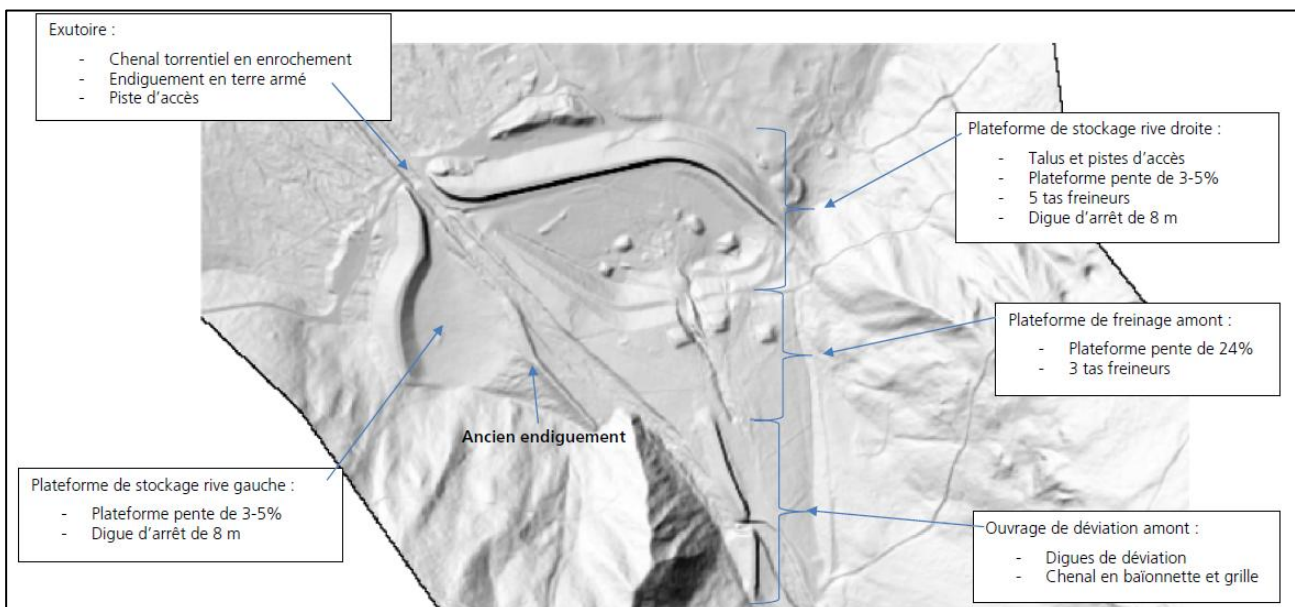


Figure 5 : dispositif de protection contre les avalanches au Bourgeat sur fond lidar IGN - extrait document RTM74

dispositif. Une première tranche d'opération consistant à rehausser la digue d'arrêt a été lancée en 2023.

Dans cette opération, le service RTM 74, proposant un nouveau dimensionnement fonctionnel au Maître d'Ouvrage (réhausse de la digue frontale), s'est adjoint les services d'un bureau d'étude géotechnique en vue d'étudier la stabilité structurale de la réhausse (stabilité externe, interne) sous les situations de calculs données.

La digue initiale avait été érigée en « pneusol », sous des principes de dimensionnement qui étaient ceux de l'époque pour cette typologie d'ouvrage (principes GTR adaptés pour la mise en œuvre). A l'extrémité est de la digue rive droite, les profils étant contraint, il était initialement envisagé de proposer une réhausse en mur poids constitué d'un enrochement bétonné. Le bureau d'étude géotechnique proposa une première version de calcul qui consistait à réaliser un „calcul en retour“ de la digue existante, i.e. réaliser un calcul en stabilité à la rupture circulaire sous coefficients unitaires. Il était visé un facteur de sécurité (FS) de 1, les caractéristiques effectives de cisaillement étant les variables du „calcul en retour“. Sur cette base étant sensée modéliser la situation initiale, la réhausse était projetée, puis les différentes situations de calculs réalisés, sous coefficients partiels cette fois-ci. Cumulée à d'autres arguments du bureau d'étude, cette démarche conduisait soit à un ouvrage de type paroi clouée en partie aval de l'ouvrage, soit à prévoir des renforts en micropieux dans le remblai existant (cf. Figure 6). La solution micropieux retenue n'apparaissait pas satisfaisante sur des aspects de mise en œuvre, de principe (endommagement du remblai sous-jacent, solution très calculée sur des ouvrages de principe robuste) de coût et d'entretien. Le calcul impliquait d'ailleurs de considérer l'ouvrage actuel comme sous dimensionné.

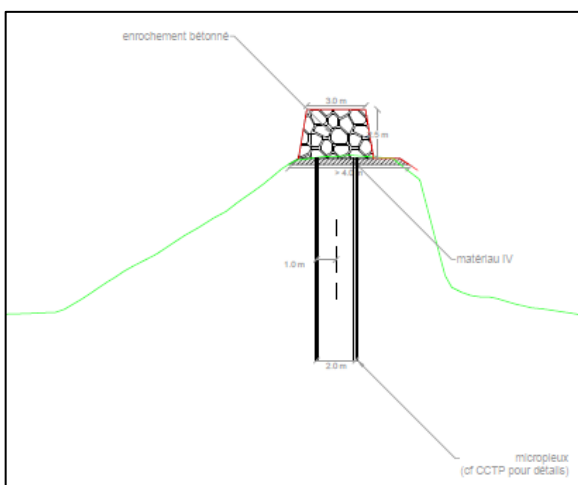


Figure 6 : solution proposée au PRO pour la réhausse de la digue du Bourgeat, profil Est

Dans l'objectif de favoriser une optimisation géotechnique, le marché a permis la proposition de variante sur ce point. Les entreprises pouvaient proposer en G3 leur approche de justification de la réhausse, les études géotechniques de projet étaient annexées au CCTP. L'entreprise titulaire proposa et réalisa finalement une solution identique à la solution imaginée au départ. La G3 a produit des études soumises à VISA, retenant une solution de réhausse en remblai renforcé cumulé à une recharge du talus aval buté en pied par un ouvrage poids (cf. Figure 7). A partir du constat des pentes maximales (40°) et moyennes (3H/2V) présentes sur l'ouvrage existant, il a été effectué un « calcul à rebours » qui consistait en un calcul en stabilité à la rupture circulaire sous coefficients unitaires, recherchant un FS supérieur à 1,3 et 1,1 respectivement pour les pentes moyennes et maximales. Cette approche était plus conforme au dimensionnement de l'ouvrage existant et permettait de trouver des marges afin de projeter la réhausse vérifiée pour sa part selon les Eurocodes.

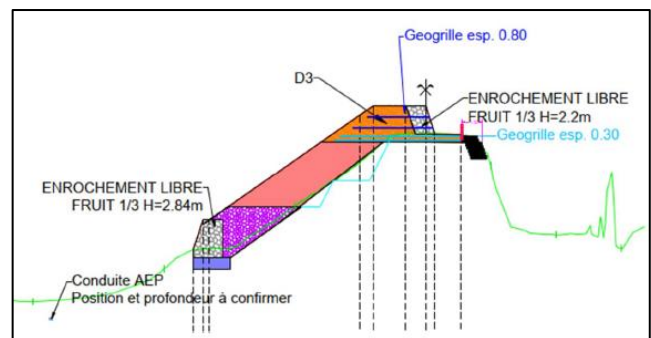


Figure 7 : variante proposée et réalisée par le titulaire pour la réhausse de la digue du Bourgeat, profil est

### 3 CONCLUSIONS

L'exposé de ces expériences nous amène à exprimer les réflexions suivantes et à proposer de redéfinir avec pragmatisme la méthode d'évaluation et de justification des OPRN existant, adaptée au besoin du gestionnaire :

- Les normes françaises transposant les Eurocodes ne constituent pas un manuel de gestion d'un parc d'ouvrage et encore moins un guide de gestion des risques naturels. En corollaire, les missions de la NF-P 94-500 concernent des ouvrages et non pas des phénomènes. Le géotechnicien, si tant est qu'il se définit par les missions relevant de cette norme, est un spécialiste du risque géotechnique associé à l'ouvrage. Ses missions de base ne concernent donc pas le dimensionnement fonctionnel de l'OPRN : le géotechnicien est plutôt attendu sur sa

capacité à évaluer si un aspect lié au sol (en fondation ou en soutènement) présente un risque particulier pour la structure, en-dehors de l'aléa sollicitant principal objet du dimensionnement fonctionnel. Il peut être attendu pour son expertise des phénomènes, à ce titre, il devrait intégrer que cette expertise ne peut se faire dans une application stricte de ses référentiels normatifs ;

- Les maîtres d'ouvrages et gestionnaires d'OPRN se doivent de réacquérir de la compétence technique sur le lien entre dimensionnement fonctionnel et dimensionnement structural : il leur incombe de définir les fonctions et objectifs des ouvrages, jusqu'à proposer les situations de calculs et états limites associées à calculer. Ainsi, ils doivent réinvestir les normes et recommandations actuelles qui constituent les manières de faire des entreprises et bureau d'étude afin de simplifier le dialogue. Les Eurocodes spécifient bien leur domaine d'application, qui se limite à l'aspect de dimensionnement structural des ouvrages (résistance, stabilité, durabilité, aptitude au service) ainsi qu'aux catégories géotechnique 1 et 2, et n'excluant ainsi pas systématiquement leur utilisation pour le dimensionnement d'OPRN.

En perspective, il reste un travail important à réaliser en France sur le mode d'évaluation et de justification des OPRN existants. En effet, tout comme d'autres domaines - les ouvrages d'art par exemple (SETRA, 2012) - il peut être admis que la stricte application des règlements destinés aux ouvrages à construire pour évaluer un ouvrage existant n'est en général pas pertinente et peut conduire à des renforcements ou réparations injustifiés, voire à des erreurs d'appréciations. Il est plutôt préconisé une démarche de compréhension des objectifs menés par le maître d'ouvrage ou gestionnaire, avec un premier diagnostic des phénomènes à la date de réalisation de l'ouvrage. Pour la suite et l'analyse structural à proprement dit, une approche adaptée à l'aléa principal et proportionnelle à l'importance de l'ouvrage doit être envisagée. Dans ce cadre, l'analyse de l'historique et du vécu, en regard de l'accidentologie liée à la typologie d'ouvrage, doit être systématisée.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les maîtres d'ouvrages et leurs représentants : le ministère de l'agriculture, la DDT04, La DDT31, La commune des Houches.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bernard, (1927) Cours de restauration des Montagnes – 2eme fascicule – *Cours de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts*.
- Bordes (2000) Regard sur le passé de la géotechnique – Revue Française de Géotechnique, n°91, p.13 à 26.
- Carladous S., Piton G., Recking A., Liébault F., Richard D., Tacnet J.-M., Kuss D., Philippe F., Quefféléan Y., Marco O., (2016).– Towards a better understanding of the today French torrents management policy through a historical perspective, *3rd European Conference on Flood Risk Management (FLOODrisk)*, Lyon, France, vol. 7, p. 12.:  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160712011>
- Carladous, S et Chitry, H (mis à jour février 2022) sur le site internet de l'IRMA Mémento du Maire et des élus locaux. DGa8 – Les ouvrages de protection collective contre les risques naturels. DGa8. Consultable à l'adresse :  
<https://www.mementodumaire.net/dispositions-generales-2/amenagement-durable-du-territoire/dga8-les-ouvrages-de-protection-collective-contre-les-risques-naturels/> consulté le 12/12/2025.
- Martin Rémy, Yannick Robert, Pierre Dupire, Olivier Fayard, Simon Carladous. Histoire de l'usage des modèles de propagation de blocs dans un organisme gérant des problématiques de risques naturels en montagne. Rev. Fr. Geotech. 2022, 170, 4.  
<https://doi.org/10.1051/geotech/2021031>
- Piton, Carladous, Marco, Richard, Liébault, et al., (2019). Usage des ouvrages de correction torrentielle et plages de dépôt : origine, état des lieux, perspectives. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau* (2019), pp.56-67. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019008>
- Palisse, J Briand, S Gili, V Mauranne, Y Sassus, F Jellouli, M (2025). Barrage de l'One (31) – cas d'étude d'analyse de risque pour un barrage voûte torrentiel. *Colloque „Sûreté des barrages et enjeux“*. Aix-les-bains, 19 et 20 Mars 2025.
- RTM04 Service RTM des Alpes-de-Haute-Provence (2023) Alpes de Haute-Provence, commune des Mées, Périmètre RTM Basse Bléone, Forêt domaniale des Pénitents, Division domaniale du Ravin de la Combe – Etude de bassin de risque – Version provisoire
- RTM31 Service RTM de Haute-Garonne (2020) Etude de bassin de risques – Rivière et barrage de l'One, Série RTM de l'One.
- SETRA (2012) Note d'information – Méthodes courantes d'évaluation structurale des ouvrages existants – pratiques en vigueur dans le réseau Scientifique et technique (RST).  
<https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/16932/methodes-courantes-d-evaluation-structurale-des-ouvrages-existants-pratiques-en-vigueur-dans-le-rese?lg=fr-FR>
- Thiéry E. (1891). *Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement*.