

REHABILITATION DU BARRAGE DE ROPHEMEL

Rehabilitation of the Rophemel dam

Hamdi HENTATI, Johan JANTZEN

GEOS Ingénieurs Conseils SA, Chemin du Pont-du-Centenaire 110, Plan-les-Ouates / Genève

hamdi.hentati@geos.ch ; johan.jantzen@geos.ch

Erwann GUIRRIEC

Collectivité Eau du bassin Rennais, 2 rue de la Mabilais, Rennes

eguirriec@ebr-collectivite.fr

MOTS CLEFS

Barrage à voûtes multiples, Rophémel, diagnostic exhaustif, étude de dangers, vidange, réhabilitation, dragage, dispositif d'étanchéité par géomembrane.

KEY WORDS

Multiple arch dam, Rophémel, exhaustive diagnosis, hazard study, drainage, rehabilitation, dredging, geomembrane waterproofing device.

RÉSUMÉ

Le barrage de Rophémel, implanté sur les communes de Guenroc et de Plouasne, a été construit entre 1931 et 1938 dans le cadre d'une concession hydroélectrique confiée à EDF. Il s'agit d'un barrage à voûtes multiples en béton. En 2015, l'Etat a cédé le barrage à la Collectivité Eau du Bassin Rennais qui a alors engagé d'importants travaux de modernisation (rétablissement de la continuité écologique, rénovation de la centrale hydroélectrique, etc...).

L'étude de dangers réalisée en 2020 sur ce barrage a été l'occasion d'actualiser l'analyse des risques de ce barrage vieillissant, à l'appui d'un diagnostic exhaustif, réalisé en 2018 (hors d'eau à bas niveau) et en 2019 (inspection subaquatique). Ce diagnostic, complété par les inspections annuelles, a révélé une dégradation progressive des bétons, en grande partie causée par une dégradation de l'étanchéité amont du barrage. L'étude de dangers de 2020 a conclu à la nécessité de reprendre à moyen terme cette étanchéité amont à retenue vide. Après échange avec les services de l'Etat, plusieurs études approfondies ont été menées de 2020 à 2022 avec notamment la réalisation de calculs de stabilité du barrage sur la base d'une hydrologie actualisée. Ces calculs ont permis de vérifier la stabilité globale du barrage et son intégrité structurelle.

En parallèle, le maître d'ouvrage, très impliqué, a fait engager dès 2021 des études de programmation des travaux intégrant les contraintes environnementales et d'alimentation en eau potable. Il a pris l'option de faire réaliser les travaux dès 2024, et a engagé dès 2022 toutes les démarches et études lui permettant d'obtenir l'autorisation de ces travaux. Les études d'avant-projet ont notamment fait ressortir le besoin d'accompagner la vidange d'une phase préalable de dragage des sédiments, et de compléter le programme des travaux par la modernisation des équipements hydromécaniques.

Les travaux de dragage ont été réalisés début 2024. La vidange du réservoir s'est achevée au début du mois de mai 2024. La phase d'asec comprenant la reprise de l'intégralité de l'étanchéité du parement amont, la réhabilitation des bétons des structures du parement amont et la modernisation des équipements hydromécaniques (notamment le batardeau amont et les équipements de manœuvre de la vanne de vidange de fond) s'achevée au cours du mois de décembre 2024. Le remplissage de la retenue est en cours à la date de rédaction du présent article. Il sera suivi de la phase post vidange qui comprend la réhabilitation des bétons des structures à l'aval et en crête.

ABSTRACT

The Rophémel dam, located at Guenroc and Plouasne, was built between 1931 and 1938 as part of a hydroelectric concession for EDF. It is a multiple-arch concrete dam. In 2015, the government transferred the dam to the Collectivité Eau du Bassin Rennais, which then undertook major modernization works (restoring ecological continuity, renovating the hydroelectric power plant, etc.).

The hazard study carried out in 2020 was an opportunity to update the risk analysis of this aging dam, based on an exhaustive diagnosis carried out in 2018 (out of water at low level) and in 2019 (underwater inspection). This diagnosis, supplemented by annual inspections, revealed a progressive deterioration of the concrete, largely caused by a deterioration of the upstream waterproofing of the dam. The 2020 hazard study concluded that it was necessary to renovate at medium term this upstream waterproofing with an empty reservoir. After discussions with government authorities, several in-depth studies were carried out from 2020 to 2022, including the stability calculations of the dam based on updated hydrology. These calculations made it possible to verify the overall stability of the dam and its structural integrity.

At the same time, the project owner, who was very involved, commissioned studies undertaken in 2021 to define the works program, integrating environmental and drinking water supply constraints. He opted to have the works carried out in 2024, and in 2022 he began all the steps and studies required to obtain authorizations for these works. The preliminary design studies highlighted the need to accompany the emptying of the reservoir with a preliminary phase of sediment dredging, and to complete the works program by modernizing the hydromechanical equipment.

The dredging work was carried out in early 2024. The reservoir was emptied in early May 2024. The drainage phase including the restoration of the waterproofing of the upstream facing, the rehabilitation of the concrete of the upstream facing structures and the modernization of the hydromechanical equipment (mainly the upstream gate and the operating equipment of the bottom valve), was completed during the month of December 2024. The filling of the reservoir is underway at the time of writing. It will be followed by the post-drainage phase which includes the rehabilitation of the concrete of the downstream and crest structures.

1. PRESENTATION DU BARRAGE

Le barrage de Rophémel, implanté sur les communes de Guenroc et de Plouasne, a été construit entre 1931 et 1938, par les entreprises BACHY et MONOD puis LEON BALLOT d'après les plans du bureau d'études PELNARD-Considère et CAQUOT, dans le cadre d'une concession hydroélectrique confiée à EDF. Il est depuis 1964 à double usage : production d'hydroélectricité en période hivernale et production d'eau potable en période estivale. En 2015, l'Etat a cédé le barrage à la Collectivité Eau du Bassin Rennais qui a alors engagé d'importants travaux de modernisation, dont des travaux en 2018-2019 d'automatisation de la manœuvre des vannes d'évacuation des crues, de rétablissement de la continuité écologique pour les anguilles et de rénovation de la centrale hydroélectrique par les entreprises ACTEMIUM et DLE Ouest.



Figure 1 : Parement amont du barrage de Rophémel

Le barrage de Rophémel est un barrage à voûtes multiples en béton, appuyé sur du granite. Il présente une légère courbure en plan (rayon de 370 mètres). La hauteur au-dessus du terrain naturel est de 26 m pour un volume à retenue normale de l'ordre de 4,9 Mm³. C'est un barrage de classe B.

Le barrage est constitué de 16 voûtes minces en béton armé, d'un évacuateur de crues et de culées de rive. Les voûtes ont une ouverture entre murs de 5,4 m et une hauteur de 10,8 m à 25,6 m. L'épaisseur varie de 17 cm au sommet à 25 cm environ à la base pour les voûtes les plus hautes. Les voûtes sont inclinées à 45° sous la cote 35,70 m NGF, puis se relèvent pour finir verticalement en crête, à la cote 46,70 m NGF.

À la base, les voûtes s'appuient sur une semelle de pied amont de hauteur égale à 90 cm environ pour les voûtes les plus hautes. Le barrage dispose de 3 voiles d'étanchéité réalisés le long du pied amont. Le drainage du terrain naturel à l'aval des voiles d'étanchéité est assuré par un forage de profondeur 5 m à 13 m au droit de chacune des voûtes (sauf pour la voûte abritant la vidange de fond) mis en place en 1961 (total de 15 drains).

Les voûtes s'appuient sur des contreforts dont l'épaisseur varie de 15 cm au sommet à 50 cm environ à la base pour les contreforts les plus hauts. Les contreforts s'appuient sur des semelles de hauteur égale à 70 cm environ pour les contreforts les plus hauts. Le contreventement de la structure est assuré par des nervures (raidisseurs verticaux) intégrées aux contreforts sur lesquelles viennent prendre appui des entretoises majoritairement horizontales espacées de 5 m horizontalement et verticalement. La hauteur des semelles des contreforts est augmentée localement de 1 m au niveau des redans situés sous les nervures.



Figure 2 : Modélisation 3D – vue aval du barrage (Hamel Géomètres Experts)

Des travaux de ragréage du parement aval ont été effectués en 1991 par l'entreprise BTPS. Ces travaux ont permis de traiter l'ensemble des voûtes à l'exception de la zone de l'évacuateur. Les travaux ont commencé par un nettoyage des bétons par sablage ou lavage haute-pression. Par la suite, un examen des bétons a permis de déterminer l'ensemble des zones à traiter et de procéder aux travaux de repiquage au marteau pneumatique. Les aciers mis à nu ont été sablés et traités avec un produit passivant. Le ragréage des bétons a été réalisé manuellement avec parfois l'emploi de coffrage pour les épaisseurs les plus importantes. Enfin, un traitement préventif a été mis en œuvre sur l'ensemble

du parement. Il s'agit d'un enduit d'imperméabilisation sur les poutres et d'un produit hydrofuge sur l'ensemble de l'ouvrage.

Le couronnement du barrage, dont la longueur est de 126 m, intègre une passerelle de circulation de 2,5 m de largeur constituée par une structure poutres-dalle en béton armé comportant des joints de dilatation toutes les 2 voûtes. La passerelle permet l'accès aux plateformes et portiques de manœuvre des équipements hydromécaniques.

L'étanchéité amont est constituée par une chape réalisée par un enduit de ciment de 4 à 5 cm d'épaisseur en gunite armé d'un grillage métallique recouvert d'un revêtement bitumineux.

Lors de la vidange de 1955, l'exploitant a fait procéder à des travaux de réfection de l'enduit de protection au niveau de la naissance des voûtes. Ces travaux ont consisté à repiquer localement l'enduit et mettre en œuvre un nouvel enduit bitumineux. La totalité du parement a reçu après nettoyage deux couches d'un revêtement bitumineux (Inertol). En 1986, une reprise de l'enduit très localisée fut effectuée près de la rive droite.

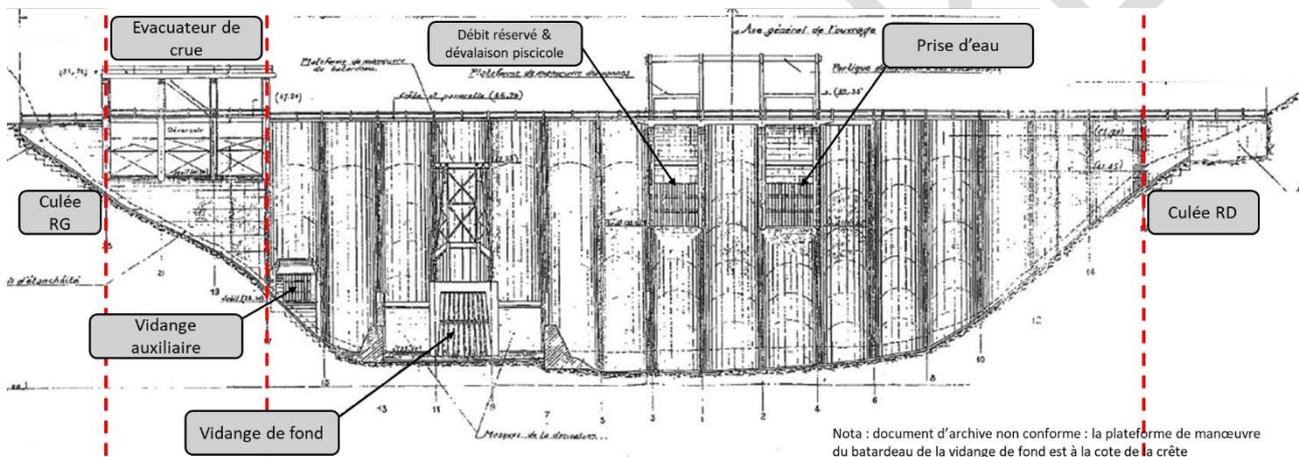


Figure 3 : Parement amont – ouvrages d'évacuation et de vidange

L'évacuateur de crues du barrage de Rophémel comprend 3 passes calées à la cote 41,50 m NGF. Chaque passe est fermée par une vanne wagon métallique en 2 parties de largeur 4,8 m et d'une hauteur totale de 3,7 m. La partie inférieure du tablier (appelée « vanne ») présente une hauteur de 2,50 m, la partie supérieure (appelée « vannelle »), une hauteur de 1,2 m. L'arase supérieure de la vannelle en position fermée correspond à la cote de Retenue Normale, soit 45,20 m NGF. La capacité totale d'évacuation de l'évacuateur de crue est de 198 m³/s à la cote de retenue normale et 327 m³/s à la cote de la crête.

La vidange de fond, implantée entre les contreforts 9 et 11 et dont le seuil est à la cote 23,00 m NGF, est constituée de l'amont vers l'aval d'un plan de grilles, d'un batardeau amont, d'une vanne wagon de largeur 1,3 m et de hauteur 2 m distante de 8 m environ du batardeau, d'un conduit à surface libre de 4 m x 4,5 m aménagé entre deux contreforts et d'un chenal se jetant dans le canal de fuite de la centrale. La capacité d'évacuation de la vidange de fond est de 49 m³/s à la cote de retenue normale.

Une vidange secondaire de demi-fond, appelée "vidange auxiliaire", est disposée entre la vidange de fond et l'évacuateur de crues, au pied de la voute 15-17.

Le barrage dispose également de 2 prises d'eau en partie centrale, au droit des voutes 2-4 et 1-3. Il s'agissait des ouvrages d'amenée d'eau à la centrale qui rejoignaient une vanne de pied de type papillon située dans le bâtiment de la centrale. Depuis les travaux de 2018-2019 et la condamnation

d'un des 2 groupes, l'une des 2 prises d'eau n'est plus destinée au turbinage mais sert au débit réservé et à la dévalaison des anguilles.

Le dispositif d'auscultation du barrage de Rophémel se compose de :

- 2 pendules directs installés sur le contrefort 7 (côté rive gauche) et sur le contrefort 8 (côté rive droite),
- 10 drains de décompression à l'aval du voile d'étanchéité,
- 11 points de mesures de fuites à l'aval du barrage (10 collectent les débits à l'aval des voûtes et 1 en culée rive droite),
- 16 repères de planimétrie (cocardes scellées sur l'ouvrage) déterminée à partir d'un réseau constitué de 4 piliers et de 6 références extérieures,
- 2 capteurs de pression hydrostatique et 2 sondes radar pour la mesure du niveau de la retenue.

2. ETUDE DE DANGERS DU BARRAGE

La 1^{ère} étude de danger du barrage de Rophémel a été réalisée en 2009 par EDF-CIH. L'actualisation de l'EDD a été réalisée entre 2020 et 2022 par le bureau GEOS, bureau agréé titulaire d'une mission d'assistance technique pour la surveillance, l'auscultation et des études spécifiques liées aux barrages de la collectivité. L'élaboration de l'étude de dangers actualisée a été un processus itératif avec des échanges entre le bureau GEOS, le maître d'ouvrage et le Service de Contrôle de la Sécurité des Ouvrages Hydrauliques (SCSOH) avec l'appui technique du Pôle National de la Sécurité des Ouvrages Hydrauliques (PONSOH).

Une 1^{ère} version de l'EDD actualisée a été élaborée en 2020. Elle s'appuie entre autres sur un diagnostic exhaustif dont notamment une inspection par drone en 2018 avec une retenue à bas niveau et une inspection subaquatique en 2019.

Suivant les conclusions de la 1^{ère} version et des recommandations formulées par le service de contrôle et de son appui technique, une révision de l'EDD actualisée a été élaborée en 2022 en s'appuyant sur des études approfondies complémentaires menées de 2020 à 2022 avec notamment la réalisation de calculs de stabilité sur la base d'une hydrologie actualisée, et sur les observations du service de contrôle sur la 1^{ère} version de l'EDD actualisée.

2.1. Bilan de l'état du barrage

Diagnostic exhaustif

La 1^{ère} version de l'EDD de 2020 [4] dresse le bilan de l'état du barrage en s'appuyant sur le diagnostic exhaustif du barrage qui s'est déroulé en deux phases :

- 1^{ère} phase : En été 2018, le niveau bas de la retenue nécessaire aux travaux de rétablissement de la continuité piscicole (environ 35 m NGF) a été mis à profit pour :
 - Une inspection par drone de l'ensemble des structures émergées, notamment la partie émergée du parement amont ;
 - Une inspection visuelle depuis la crête du barrage et par barque, à bas niveau de retenue, du parement amont par l'ingénieur génie civil du bureau GEOS, en charge du suivi du barrage de Rophémel.
- 2^{ème} phase : En été 2019, à niveau haut de retenue, le diagnostic exhaustif a été complété par des inspections subaquatiques par ROV des structures immergées du parement amont.

Les principales observations du diagnostic exhaustif sont les suivantes :

Parement amont

L'inspection visuelle du parement amont à niveau bas de la retenue a mis en évidence :

- L'état du parement est relativement homogène d'une voûte à l'autre ;
- La teinte foncée qui correspond à l'étanchéité de surface en produit bitumineux a globalement disparu dans la zone de marnage ;
- La partie haute des voûtes laisse apparaître à plusieurs endroits les armatures du gunitage. Dans la partie habituellement immergée du barrage, la protection bitumineuse de surface n'est plus que faiblement présente.

L'inspection par drone [3] a permis de constater, localiser et quantifier les désordres visibles. Il s'agit principalement des désordres observés lors de l'inspection visuelle (dégradations de la protection bitumineuse et armatures de gunitage apparents), ainsi que des fissures calcifiées principalement sur les culées de rive, et une perte d'épaisseur de la couche de gunitage avec mise à nu des armatures sur le seuil de l'évacuateur de crue. Concernant l'état des bétons, on peut signaler qu'EDF qui suivait le barrage avant GEOS, signalait que le barrage de Rophémel était globalement en meilleur état de conservation que les autres barrages-voûtes qu'ils exploitaient.

Lors de l'inspection subaquatique [2], une grande partie du parement s'est avérée masquée par un enchevêtrement d'embâcles (troncs d'arbres) très imbriqués les uns dans les autres, que seuls des travaux de grappinage permettraient de retirer.

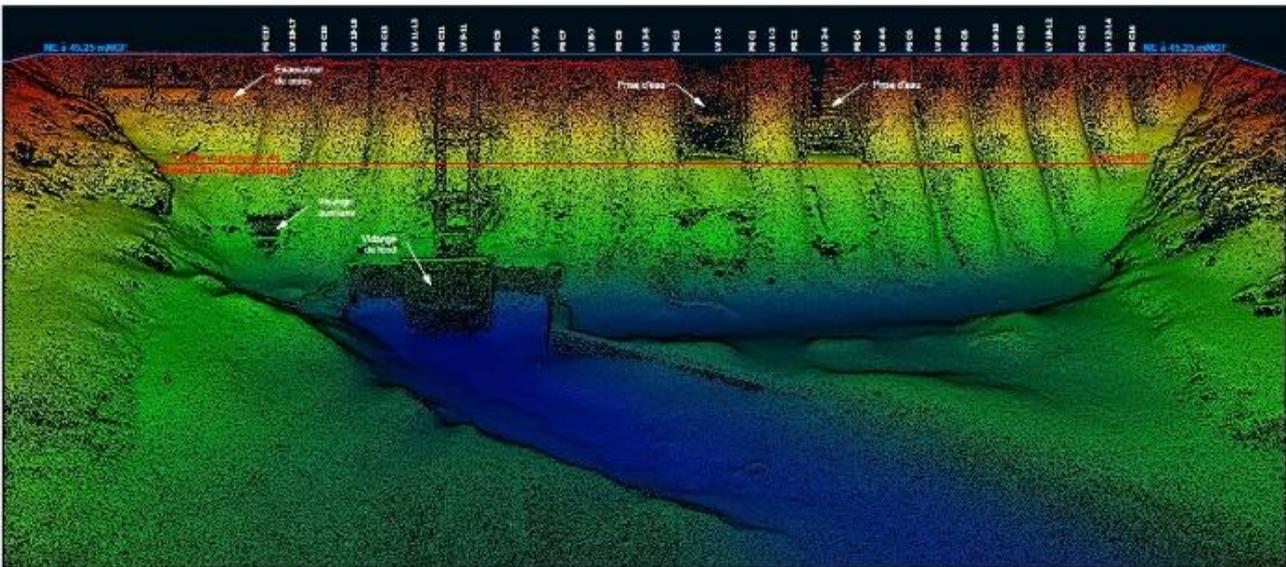


Figure 4 : Examen subaquatique des parties immergées à l'amont du barrage (SATIF OA)

Le balayage complet des parties visibles du parement n'a pas révélé de dégradation notable visible. L'inspection a également permis d'établir un profil général de l'état d'envasement en pied du parement.

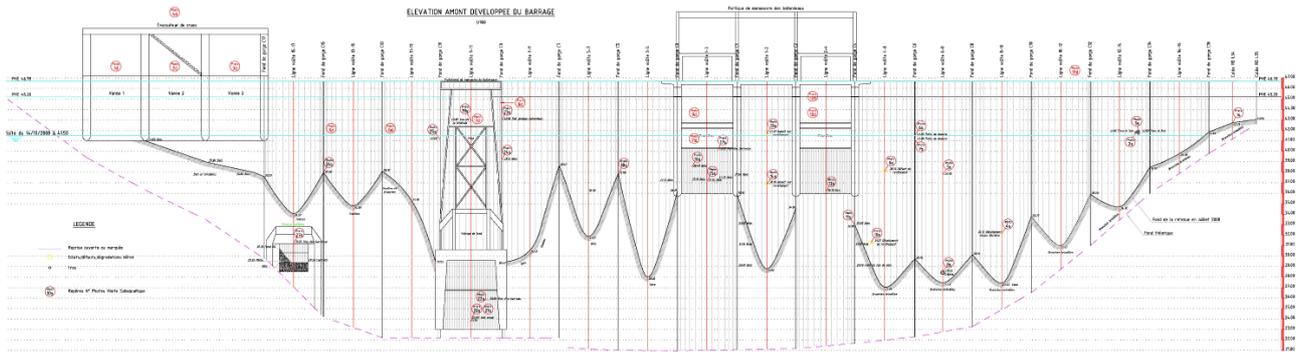


Figure 5 : Profil général de l'état d'envasement en pied du parement (SATIF OA)

L'inspection de la vidange de fond n'a révélée aucune dégradation notable. La grille est relativement dégagée malgré la présence d'un dépôt de vase et de branchages sur la partie inférieure sur environ 1,0 m de haut au-dessus du radier.

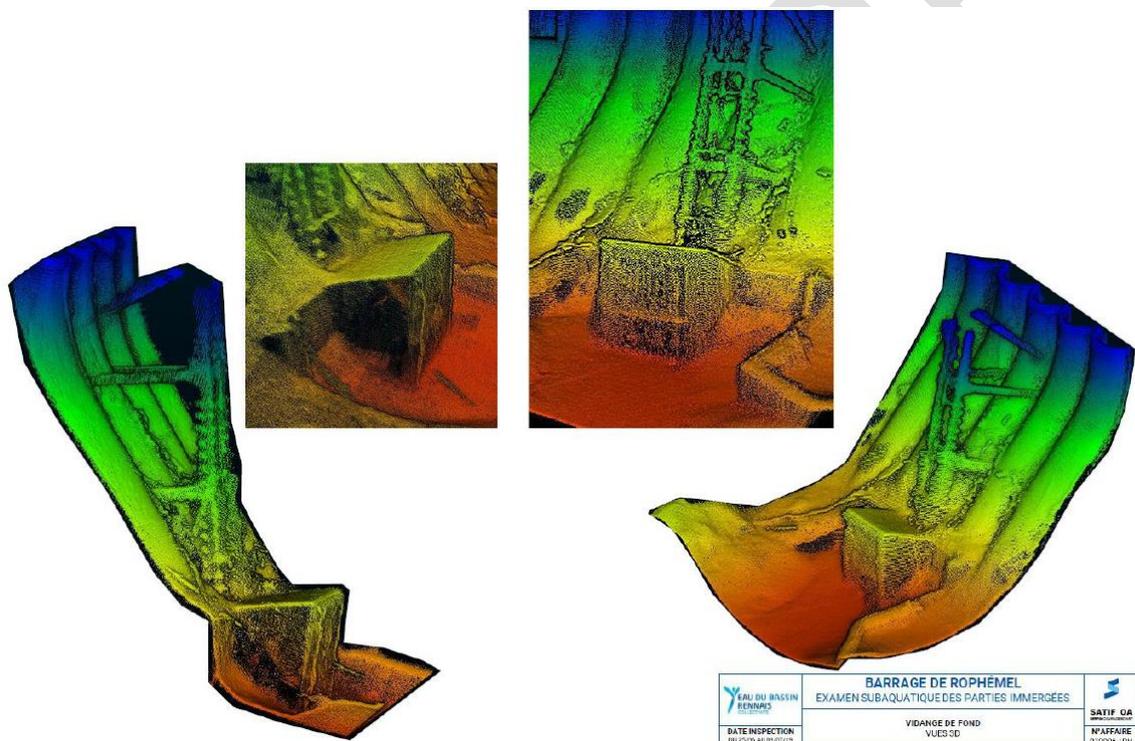


Figure 6 : Examen subaquatique à l'amont de la vidange de fond (SATIF OA)

Parement aval

Les inspections annuelles du barrage ont mis en évidence de nombreuses dégradations des bétons du parement aval :

- Les reprises de bétonnage entre contreforts et voûtes sont souvent l'endroit de défauts observables à partir de la crête, principalement des épaufrures et des aciers apparents, qui témoignent de la corrosion des armatures.
- Des suintements apparaissent souvent sur les reprises de bétonnage, en fonction du niveau de la retenue., témoignant de la perte d'étanchéité du revêtement en parement amont.
- Des dégradations de type « éclat béton » ou « aciers apparents » sont relevées sur presque l'ensemble du parement aval : faces aval des voutes, contreforts, butons et entretoises.
- Les armatures visibles sont souvent totalement corrodées et d'épaisseur négligeable.

L'inspection par drone [3] a permis de confirmer les constats, déjà faits par les inspections annuelles, et de localiser et quantifier ces désordres.

Bilan et recommandations

La 1^{ère} version de l'EDD de 2020 [4] conclut que le barrage de Rophémel est dans un état jugé acceptable mais « vieillissant ». La pérennité du barrage repose sur le maintien des performances structurales des fines épaisseurs de béton ; il y a donc lieu de préserver le barrage contre toute dégradation d'ampleur de ce béton. La perte d'étanchéité amont participe au vieillissement des structures minces en béton armé du barrage. Les inspections périodiques et le diagnostic exhaustif révèlent la nécessité de reprendre l'étanchéité amont du barrage, et de traiter les désordres présents ponctuellement à l'aval des voûtes, sur les contreforts et les entretoises.

L'analyse de risque identifie la dégradation des caractéristiques du béton du barrage comme un événement initiateur de l'ERC « Rupture du barrage » avec une criticité « intermédiaire ». Les travaux de pérennisation des structures en béton (reprise de l'étanchéité amont et traitement des désordres) sont identifiés comme une mesure de réduction de risque visant à améliorer la criticité de l'ERC « Rupture du barrage ». L'EDD recommande de réaliser ces travaux à moyen terme. Cette recommandation est partagée par le service de contrôle.

2.2. Hydrologie et évacuation des crues

La 1^{ère} version de l'EDD de 2020 [4] dresse le bilan de conception du barrage. La définition des débits caractéristiques de crues s'appuie sur les données d'une étude hydrologique de 1995. L'EDD conclut que cette étude utilise des méthodes encore reconnues aujourd'hui, mais qu'elle date de 25 ans et mériterait une actualisation.

Selon les données de l'étude hydrologique de 1995, le débit de pointe d'une crue millénale $Q_{1'000}$ est estimé à 199 m³/s. On rappelle que la capacité totale d'évacuation de l'évacuateur de crue est estimée à 327 m³/s à la cote de la crête.

L'EDD note par ailleurs que selon les données de l'étude hydrologique de 1995, il n'est pas possible de s'assurer de l'absence de surverse du barrage pour un événement de probabilité annuelle 10^{-5} (débit de pointe d'une crue $Q_{100'000}$ estimé à 360 m³/s). La surverse est initiée pour une crue dont le temps de retour est de l'ordre de 40'000 ans. Pour autant, les exigences réglementaires d'évacuation des crues, telles que fixées dans l'arrêté de 2018 pour un barrage de classe B, sont bien respectées pour le barrage de Rophémel.

L'EDD recommande de mettre à jour dans un premier temps l'hydrologie et de vérifier les probabilités de déversement. Cette recommandation est partagée par le service de contrôle.

A la suite de cette 1^{ère} version de l'EDD, le maître d'ouvrage a mandaté le bureau GEOS pour mettre à jour l'étude hydrologique.

La nouvelle étude [6] s'appuie sur des données actualisées. Elle conduit à une révision significative à la hausse des débits caractéristiques de crues. Le débit de pointe d'une crue millénale Q_{1000} est estimé à 306 m³/s, soit une hausse de 53% par rapport à l'étude hydrologique de 1995. Pour autant, le calcul de laminage de la crue millénale montre que la retenue atteint la cote 46,30 m NGF soit 40 cm sous la cote de crête.

Concernant l'absence de surverse, en s'appuyant sur l'actualisation de l'hydrologie, on ne peut pas assurer l'absence de surverse du barrage pour un événement de probabilité annuelle 10^{-4} (débit de pointe d'une crue décamillénale $Q_{10'000}$ estimé à 420 m³/s). Les exigences réglementaires d'évacuation

des crues, telles que fixées dans l'arrêté technique barrage de 2018 pour un barrage de classe B, sont bien respectées pour le barrage de Rophémel.

Toutefois, en l'absence d'une évaluation des conséquences des déversements en crête pour le barrage et le rocher de fondation, l'analyse de risque menée dans le cadre de l'étude de dangers révisée en 2022 [7] identifie la crue avec surverse du barrage comme un évènement initiateur de l'ERC « Rupture du barrage » avec une criticité « élevée ». L'EDD recommande de :

- engager une étude pour évaluer les conséquences des déversements en crête pour le barrage et le rocher de fondation (impacts sur les butons, érosion du rocher) et définir le cas échéant la hauteur de déversement acceptable en crête du barrage.
- engager une étude pour définir des mesures d'amélioration de l'évacuation des crues (mesures de réduction des risques) comprenant une réflexion sur : 1/ l'amélioration de la connaissance des débits entrants par une instrumentation des cours d'eau alimentant la retenue, 2/ l'augmentation de la capacité d'évacuation par l'utilisation de la vanne de fond comme organe d'évacuation pour les crues extrêmes, 3/ la rehausse éventuelle de la cote d'arase des voûtes & effectuer les travaux associés.

2.3. Stabilité du barrage

La 1^{ère} version de l'EDD de 2020 [4] dresse le bilan de conception du barrage. Le barrage dispose de calculs justifiant sa stabilité. Ces calculs s'appuient sur les méthodes de dimensionnement de l'époque. Leur analyse n'amène pas de remise en cause fondamentale, bien que des recommandations soient formulées pour une mise à jour des calculs de ferrailage, afin de vérifier la capacité du béton armé des voûtes à résister aux efforts appliqués selon les règles actuelles de dimensionnement. Cette recommandation est partagée par le service de contrôle.

A la suite de la mise à jour de l'étude hydrologique, le maître d'ouvrage a mandaté le bureau GEOS pour réaliser une étude de stabilité du barrage [5]. La nouvelle étude s'appuie sur un modèle simplifié aux éléments finis élaboré à l'aide du logiciel CODE_ASTER. Le modèle correspond à une section courante représentative du barrage et comprend deux contreforts, une voûte et deux demi-voûtes :

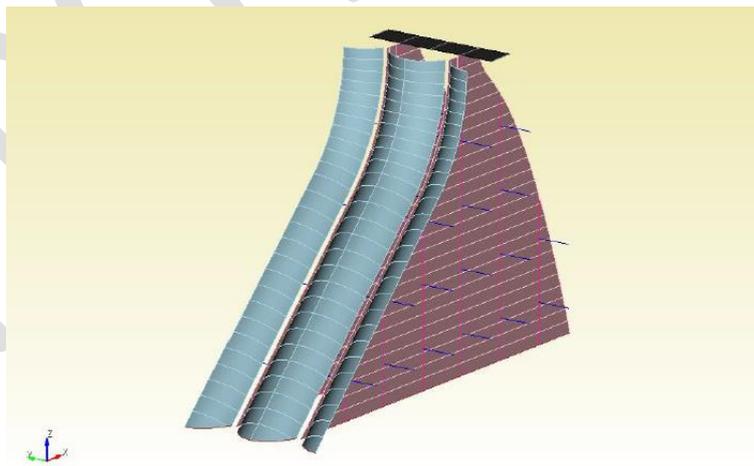


Figure 7 : Vue du modèle aux éléments finis

Stabilité globale

La stabilité des contreforts au glissement et au renversement et la capacité portante de la fondation sont vérifiées suivant les recommandations du CFBR et la norme NF P94-261.

Calcul de béton armé

Les sections d'armatures nécessaires pour garantir la stabilité structurelle des voutes et des contreforts sont calculées suivant les critères de la norme NF EN 1992-1-1 et comparées aux sections d'armatures mises en œuvre. Le calcul montre que les armatures mises en œuvre couvrent les sections nécessaires.

Déplacements

Le calcul aux éléments finis a été mis à profit pour évaluer les déplacements prévisibles mesurés par les deux pendules du barrage lors de la vidange (situation « non habituelle »). Pour cela, les déplacements obtenus par le calcul ont été corrélés aux déplacements auscultés du barrage. Cette corrélation consiste à comparer les déplacements calculés par le modèle aux éléments finis pour des situations de projet « habituelles » (niveau de la retenue variant entre le niveau minimum d'exploitation et la retenue normale, conditions estivales et hivernales moyennes) et les déplacements calculés par les lois de régression issues des analyses HST des déplacements mesurés des deux pendules.

La comparaison permet d'établir des relations linéaires entre les déplacements calculés avec le modèle et ceux déduits des lois de régression. Ces relations permettent de traduire plusieurs paramètres dont :

- les écarts entre la hauteur modélisée et la hauteur du barrage au niveau des pendules ;
- les hypothèses de calcul sur le module de déformation du béton ;
- la différence des états de référence : l'état de référence correspondant à la situation de l'ouvrage lors de la mise en place des pendules n'est pas connu.

Par la suite, le déplacement calculé par le modèle aux éléments finis pour une retenue vide et différentes conditions thermiques est traduit en déplacement prévisible au niveau des deux pendules. Ces prévisions sont intégrées dans les consignes provisoires d'exploitation et prises en compte dans l'analyse de l'auscultation du barrage pendant les phases provisoires.

3. SUITES DONNEES A L'ETUDE DE DANGERS

3.1. Etude préalable de programmation des travaux de réhabilitation

Dès la 1^{ère} version de l'EDD de 2020 [4], le maître d'ouvrage a mandaté en 2021 le bureau GEOS pour établir une étude préalable de programmation des travaux de réhabilitation :

Etat des lieux [8]

L'état des lieux s'appuie sur le diagnostic exhaustif de l'étude de dangers. En plus des travaux de reprise de l'étanchéité du parement amont et de réhabilitation des bétons des structures, l'opération est mise à profit pour réaliser d'autres travaux comprenant la reprise de l'étanchéité du batardeau amont de la vidange de fond. La réflexion s'est focalisée sur les travaux de reprise de l'étanchéité du parement amont et de réhabilitation des bétons des structures :

- Différentes solutions techniques pour la reprise de l'étanchéité du parement amont. L'analyse comparative a permis de retenir la technique d'application d'une géomembrane en PVC-P. Une préparation du support est requise avec notamment la reconstitution de la gunite dans les zones où elle est décollée ou susceptible de décoller ;
- Les travaux de reprise de l'étanchéité nécessitent le retrait de l'enchevêtrement de troncs et d'embâcles et de déplacer/évacuer les sédiments déposés en partie basse du parement ;
- Les travaux de réhabilitation nécessitent la mise en place d'échafaudages sur le parement amont et à l'aval du barrage, ainsi qu'une grue de chantier conséquente en pied aval ;
- Les travaux à l'amont du barrage nécessitent la mise en place d'un batardeau de chantier qui canalise les écoulements à travers la vidange de fond. La faible capacité de laminage et

l'hydrologie de la retenue impliquent en cas de crue une mise en charge de la conduite de vidange et une montée importante du niveau de la retenue. La mise en œuvre d'un batardeau de chantier dimensionné pour une crue décennale présente des coûts et des délais de incompatibles avec l'opération. Des dispositions sont prises lors des travaux pour alerter et évacuer le personnel et pour limiter l'impact d'un ennoïement de la zone de chantier sur les travaux en cours.

Démarches environnementales et administratives [9]

La vidange de la retenue de Rophémel a des incidences environnementales sur différents milieux dont il convient d'évaluer l'état initial afin de mettre en œuvre, durant cette opération, les mesures à même de préserver les sensibilités en présence. L'étude a permis :

- d'établir un pré-diagnostic environnemental ;
- d'inventorier les démarches environnementales administratives à mener pour permettre la vidange de la retenue et obtenir les autorisations des travaux, et établir un planning de ces démarches ;
- d'établir une pré-évaluation des incidences de l'opération sur la faune et la flore.

L'étude a également permis d'établir un cahier des charges pour la réalisation d'un inventaire écologique sur un cycle biologique complet. Cet inventaire a été commandé rapidement par le maître d'ouvrage dès début 2022.

Impact de la vidange sur la production d'eau potable [10]

L'usine d'eau potable de Rophémel produit environ 30% de la consommation annuelle d'eau potable du Bassin Rennais. L'impact de l'arrêt de l'usine d'eau potable de Rophémel pendant la vidange de la retenue est étudié sous deux angles : la capacité des installations à traiter et alimenter les besoins en eau potable, et la disponibilité de la ressource pendant la vidange.

Les besoins de production de l'eau potable sont définis à partir de l'historique et des prévisions des volumes de ventes de la Collectivité.

La Collectivité possède plusieurs installations de traitement. Les principales sont l'usine de Villejean d'une capacité de 80 000 m³/jour, l'usine de Rophémel d'une capacité de 30 000 m³/j et l'usine de Mézières sur Couesnon d'une capacité de 25 000 m³/j. Les capacités de productions sont définies en fonction de différents paramètres qui sont : l'historique de la production, les autorisations de prélèvement, les débits écologiques, les capacités nominales, la variation saisonnière du débit moyen dans les cours d'eau, la qualité de l'eau prélevée...

Le principe de fonctionnement des installations est le suivant : toutes les usines fonctionnent à leurs capacités « maximales », sauf l'usine de Villejean qui constitue la variable d'ajustement de la production. Les simulations de l'arrêt de l'usine de Rophémel sont menées suivants différents scénarios : année de la vidange, pluviométrie (année « sèche » / année « normale »), etc...

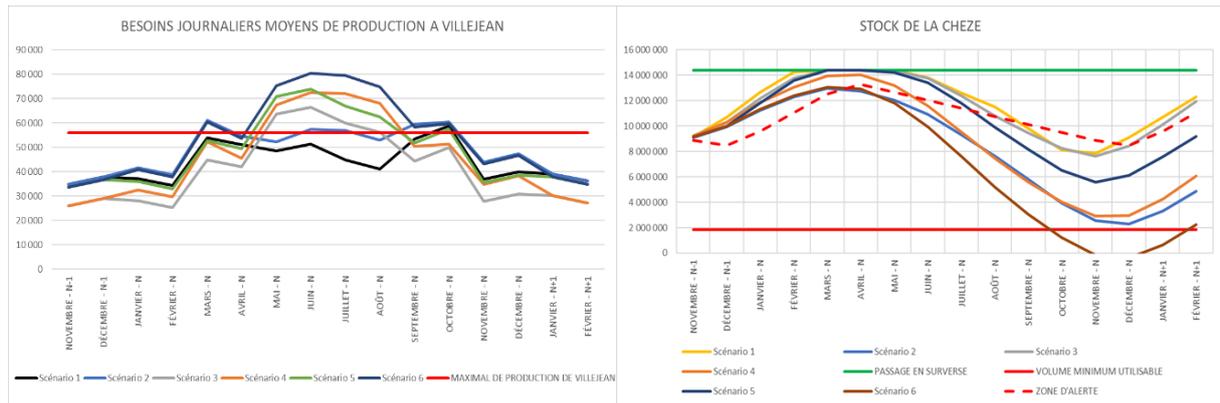


Figure 8 : Simulations de l'arrêt de l'usine de Rophémel

Programme des travaux [11]

Les travaux de réhabilitation se déroulent en deux phases : une 1^{ère} phase qui correspond à la phase d'assec dont la durée est de l'ordre de 6 mois hors délais d'abaissement et de remplissage de la retenue, et une 2^{ème} phase qui correspond à la phase post vidange dont la durée est de l'ordre de 12-15 mois. Compte tenu des différentes contraintes de réalisation de l'opération, la vidange de la retenue a été préconisée en 2024. Les besoins de production de l'usine de Villejean atteignent des valeurs proches des maximums historiquement atteints. En adoptant des mesures visant à réduire le besoin et/ou augmenter la capacité de production des différentes usines, l'alimentation en eau potable ne serait pas impactée par l'arrêt de l'usine de Rophémel, et ne nécessiterait pas des moyens de compensation conséquents (sauf éventuellement des secours ponctuels en cas d'incidents).

A la suite de cette étude, le maître d'ouvrage a mené des tests pour confirmer la capacité de l'usine de Villejean à atteindre sa capacité nominale et pour anticiper les moyens matériels et humains nécessaires à l'augmentation des capacités de production.

3.2. Maîtrise d'œuvre des travaux de réhabilitation

Le maître d'ouvrage a mandaté en 2022 le bureau GEOS pour mener les études de maîtrise d'œuvre des travaux de réhabilitation du barrage de Rophémel. Le mandat comprend également l'élaboration d'une étude d'impact et un dossier d'autorisation environnementale unique pour la vidange de la retenue réalisés par les bureaux INGEROP/ACTIERRA.

Dans le cadre des études d'avant-projet menés en 2022, et en lien avec la maîtrise de la qualité de l'eau à l'aval du barrage pendant l'abaissement de la retenue, une analyse de la dynamique sédimentaire a mis en évidence le besoin de réaliser un dragage préventif de la retenue en amont du barrage afin de limiter le transport des sédiments vers l'aval. Ce dragage consiste à curer les sédiments au droit du chenal qui se serait érodé lors de l'abaissement pour créer un chenal d'écoulement.

Par ailleurs, l'étude approfondie des travaux relatifs aux équipements hydromécaniques a mis en évidence la nécessité d'un renouvellement intégral du batardeau de la vidange de fond comprenant le renouvellement des pièces fixes et des éléments de manœuvre et de guidage, ainsi que la nécessité d'un renouvellement intégral des équipements de manœuvre de la vanne de fond qui pourrait être utilisée pour l'évacuation des crues extrêmes.

Dès le début de la mission de maîtrise d'œuvre, le maître d'ouvrage a mis en place des échanges avec les services instructeurs pour leur présenter l'opération, les conclusions intermédiaires des études et les différentes évolutions du programme des travaux, avant le dépôt du dossier d'autorisation environnementale unique. En parallèle de la mission de maîtrise d'œuvre pour les travaux de

réhabilitation du barrage de Rophémel, le maître d'ouvrage a commandé des études complémentaires, dont notamment :

- une mission de maîtrise d'œuvre pour la mise en œuvre des mesures environnementales et le suivi écologique des travaux ;
- une mission pour l'élaboration d'un modèle numérique 3D du barrage et des structures sur la base d'un relevé in-situ et des plans d'archive disponibles ;
- des investigations complémentaires pour le relevé des désordres des structures, dont notamment un relevé des désordres du parement amont par cordistes avant et après vidange de la retenue comprenant en particulier un sondage par marteau de la gunite.

3.3. Marchés de travaux de l'opération de réhabilitation du barrage de Rophémel

L'opération de réhabilitation du barrage de Rophémel fait l'objet de nombreux marchés de travaux et de services dont les principaux sont décrits ci-après :

Travaux de dragage dans la retenue

Les travaux de dragage dans la retenue à l'amont du barrage ont été attribués au groupement Océlian / Térélian / Alzéo. Après des travaux préparatoires réalisés fin 2023 et consistant principalement à la mise en œuvre des bassins de décantation des sédiments extraits de la retenue à l'aval du barrage, les travaux de dragage ont eu lieu entre janvier et mars 2024 pour un volume total de sédiments d'environ 16 000 m³. Le dragage a été réalisé au moyen d'une drague aspiratrice stationnaire (DAS) munie en bout d'élinde d'un désagrégateur qui permet de désolidariser le terrain. Celui-ci est ensuite aspiré depuis le bec d'élinde vers la pompe par l'intermédiaire d'une conduite d'aspiration. Il est ensuite transporté dans des conduites flottantes et terrestres par refoulement hydraulique (mélange eau/terrain) jusqu'aux bassins de décantation.



Figure 9 : Dragage de la retenue et refoulement hydraulique dans les bassins de décantation (mars 2024)

Travaux de purge des sédiments et des embâcles en pied et sur le parement amont

Les travaux de purge en pied et sur le parement amont ont été attribués à l'entreprise Océlian. Après l'abaissement de la retenue qui a duré environ 4 semaines, les travaux de purge des sédiments et de retrait des embâcles ont démarré en mai 2024 pour environ 2 mois.



Figure 10 : Travaux de purge en pied du parement amont (juin 2024)

La purge a été réalisée principalement par aspiration et refoulement dans les bassins de décantation pour un volume total de sédiments d'environ 1 000 m³, extraction mécanique et évacuation en filière adaptée à des macro-déchets (essentiellement des embâcles de bois) pour une quantité totale d'environ 20 tonnes, et également extraction mécanique et évacuation dans les bassins de décantation d'un volume de l'ordre de 100 m³ de matériaux tourbeux et de matériaux sableux et grossiers.

Travaux de réhabilitation du barrage de Rophémel

Les travaux de réhabilitation ont été attribués au groupement Demathieu Bard Construction / Baudin Chateaufneuf. Après des travaux préparatoires réalisés de mars à mai 2024 et consistant principalement en la mise en place d'une grue à tour en pied aval du barrage et d'échafaudages en crête, les travaux de la phase d'assec ont débuté en mai 2024 en coordination avec les travaux de purge : mise en œuvre d'un batardeau de chantier, mise en place des échafaudages en pied et sur le parement amont, reprise des désordres et préparation du support pour la pose du dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG), dépose des équipements hydromécaniques à renouveler, etc...



Figure 11 : Photographies de la retenue et du pied amont du barrage (juillet 2024)

La mise en œuvre du DEG a été réalisée par Carpitech entre juillet et novembre 2024. L'étanchéité principale est constituée d'un géocomposite SIBELON® ANT 4400 certifié ACS, formé d'une feuille de PVC de 3 mm d'épaisseur, souple et stabilisée aux U.V., extrudée en masse homogène et thermiquement couplée au cours de la fabrication à un géotextile non-tissé aiguilleté ayant une masse par unité de surface de 500 g/m², et d'une couche drainante assurée par un géosynthétique TENAX TDP-1 formé par une géogrille PEHD associée en phase de fabrication à un géotextile PP anti-contaminant.

Le DEG est mis en œuvre sur les structures minces du parement (voûtes). La surface totale est composée de 14 compartiments, soit quasiment un compartiment par voûte. Chaque compartiment est équipé en pied d'un exutoire (ponctuellement 2 exutoires) de drainage pour collecter les éventuelles fuites vers l'aval. Un carottage a été réalisé en tête de chaque voûte pour l'aération de la couche drainante. Le DEG est fixé au moyen de triples fixations mécaniques dans les gorges des voûtes et de profilés de tensionnement posés à l'axe des voûtes. Des fixations périmétrales étanches ont été réalisées sur la périmétrie du DEG directement sur le béton structurel de l'ouvrage.



Figure 12 : Photographie du parement amont (décembre 2024)

Les structures épaisses du parement (parement amont de l'évacuateur de crue, culées de rive, et massif des prises de la vidange de fond et de la vidange auxiliaire) ont reçu un mortier d'imperméabilisation (ou un mortier anti-abrasion pour les surfaces d'écoulements).

Les travaux de la phase d'assec se sont achevés en décembre 2024. Le remplissage de la retenue est en cours à la date de rédaction du présent article.

3.4. Autres

Des études sont en cours ou à venir à la date de rédaction du présent article et concernent les conséquences des déversements en crête pour les crues extrêmes, ainsi que l'amélioration de l'évacuation des crues (les travaux de renouvellement des équipements de manœuvre de la vanne de fond comprennent la possibilité d'une automatisation future de la manœuvre de cette vanne).

4. CONCLUSION

L'actualisation de l'étude de dangers du barrage de Rophémel a été un processus phasé et itératif avec des échanges entre le bureau GEOS, le maître d'ouvrage et le Service de Contrôle. L'EDD a conclu principalement au besoin d'entreprendre des travaux de réfection de l'étanchéité du parement amont et de réparation des désordres des structures de béton armé. Ces travaux, et plus particulièrement la mise en œuvre d'un DEG sur les voûtes minces, permettent de pérenniser les structures et améliorent ainsi la sécurité de l'ouvrage.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des acteurs ayant pris part à l'opération : les équipes du maître d'ouvrage, de l'exploitant et de maîtrise d'œuvre comprenant GEOS Ingénieurs Conseils,

INGEROP, Actierra, Idra Environnement et EMI Ingénierie qui ont œuvré pour la préparation, l'attribution et le suivi des marchés de travaux et de services, et pour les démarches environnementales et administratives nécessaires à l'obtention des autorisations de travaux ; les services de l'état pour les échanges tout au long de la phase d'études et qui ont permis l'obtention des autorisations de travaux dans les délais ; ainsi que les entreprises de travaux qui ont œuvré et œuvrent de concert en fournissant un travail remarquable.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Plans et documents d'archives du barrage de Rophémel
- [2] Compte-rendu d'examen subaquatique des parties immergées du barrage, SATIF OA, 2019
- [3] Inspection visuelle par drone des parements amont et aval du barrage de Rophémel, GEOSCAN, 2018
- [4] Etude de danger du barrage de Rophémel, GEOS, 2020
- [5] Etude de stabilité du barrage, GEOS, 2022
- [6] Etude hydrologique et de laminage, GEOS, 2022
- [7] Etude de danger du barrage de Rophémel, GEOS, 2022
- [8] Etat des lieux et des connaissances – Partie 1 : ouvrage, GEOS, 2021
- [9] Etat des lieux et des connaissances – Partie 2 : vidange de la retenue, GEOS/VERDI, 2021
- [10] Etat des lieux et des connaissances – Partie 3 : alimentation/production de l'eau potable, GEOS, 2021
- [11] Définition du programme des travaux, GEOS, 2021
- [12] Modélisation 3D du barrage de Rophémel, Hamel Géomètres Experts, 2023