

Travaux de réhabilitation par confortement du barrage de Pannecière (Nièvre) : retour d'expériences

Rehabilitation works of the Pannecière Dam (France): Feedback

Vincent Mouy, TRACTEBEL ENGINEERING
Le Delage – 5 rue du 19 mars 1962 – 92622 Gennevilliers – FRANCE
Vincent.Mouy@gdfsuez.com

Eric Boidy, Guillaume Barsse, Christine Noret, TRACTEBEL ENGINEERING
Le Delage – 5 rue du 19 mars 1962 - 92622 Gennevilliers – FRANCE
Eric.Boidy@gdfsuez.com, Guillaume.Barsse@gdfsuez.com, Christine.Noret@gdfsuez.com

TRACTEBEL ENGINEERING – COYNE ET BELLIER
Téléphone : +33 1 41 85 03 69, Fax : +33 1 41 85 03 74

MOTS CLES

Barrage, multi-voûtes, réhabilitation, confortement, renforcement sismique, étanchéité, géomembrane, gunite, béton projeté, retrait, clavage.

RÉSUMÉ

L'Établissement Public Territorial de Bassin Seine Grands Lacs (EPTB SGL) est le Maître d'Ouvrage du barrage de Pannecière, situé sur l'Yonne, dans le massif granitique du Morvan. Cet ouvrage dont les travaux ont débuté en 1939, et qui a pour la première fois été mis en eau en 1949, a fait l'objet d'une importante opération de réhabilitation par confortement en 2011 et 2012.

Les principaux travaux objet du retour d'expérience portent sur :

- *la construction en aval de massifs de renforcement en béton armé au pied des voûtes et de butons de contreventement entre les contreforts,*
 - *le traitement du parement amont par un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG),*
- Les conditions particulières du chantier ont amené à de nombreuses difficultés, parmi lesquelles :*
- *les écarts géométriques de l'ouvrage, nécessitant la mise au point des moyens d'accès sur le parement amont,*
 - *la méconnaissance des cotes de fondation au droit des renforts aval, nécessitant une adaptabilité des coffrages,*
 - *la mise au point de la méthode de désamiantage,*
 - *la porosité des bétons de l'ouvrage existant, gênant les opérations d'injection de clavage,*
 - *la présence d'un passage schisteux de faible résistance sous la fondation en rive gauche.*

L'article présente les différentes solutions retenues et leurs mises en œuvre.

ABSTRACT

The Public Establishment Seine Grands Lacs (EPTB SGL) is the owner and the operator of the Panneciere Dam, located on the Yonne River, in the granite massif of the Morvan. Major rehabilitation works have been performed in 2011 and 2012.

The principal feedbacks concern the civil works as following:

- *construction of massive reinforced concrete foot arches and struts bracing between the buttresses (downstream),*
- *processing the upstream face by a sealing device with geomembrane,*

Specific site conditions led to many problems, including:

- *geometric deviations of the structure, requiring the development of specific access on the upstream face,*
- *poor knowledge of foundation levels right down reinforcements, requiring adaptability of the formwork,*
- *development of the method of asbestos removal,*
- *porosity of the existing structure concrete, hindering the operations of clavage injections,*
- *the presence of shale on low resistance layer under the foundation on the left bank.*

The paper presents the different solutions adopted and performed.

1. INTRODUCTION, RAPPEL DES PRINCIPAUX OBJECTIFS DU PROJET

1.1 Présentation de l'ouvrage

1.1.1 Situation générale ; contexte géologique

Le barrage de Pannecière est un barrage à voûtes multiples d'environ 50 m de hauteur, construit entre 1939 et 1949. Il est situé dans le Parc Naturel Régional du Morvan, sur le cours de la rivière Yonne, en aval presque immédiat des confluences avec la Houssière et le Mignage.

Du point de vue géologique, l'aménagement de Pannecière est situé au voisinage de la bordure occidentale du massif du Morvan. Deux types de roches sont présents : des granites et des roches volcaniques pyroclastiques. Les granites occupent l'essentiel de la cuvette de la retenue, alors que les roches volcaniques sont présentes dans la partie nord de la retenue et forment la majeure partie des assises du barrage.

Le massif rocheux en fondation du barrage est relativement homogène. Les roches qui le composent sont dures à très dures. Leur matrice est très rigide. L'altération météorique, de faible intensité, ne semble pas pénétrer profondément. Elle est limitée à quelques mètres sous la surface actuelle et n'affecte que certaines discontinuités. La fracturation, généralement régulière, est caractérisée par une fréquence modérée à faible. Si les fissures sont majoritairement redressées, certaines discontinuités ont cependant des inclinaisons faibles ou modérées. Leur persistance n'est vraisemblablement pas élevée. Il en résulte un massif rocheux compact et peu déformable.

Le massif rocheux est estimé, dans son ensemble, peu perméable. Des venues d'eau s'expriment au gré de l'ouverture de fissures, mais aussi de la remobilisation des remplissages le long de certaines discontinuités. La fondation ne nécessite pas d'autre traitement d'étanchement et de drainage que celui qui serait nécessaire pour neutraliser les percolations modestes susceptibles de se produire dans la frange supérieure (0 - 5 à 10 m) du massif rocheux, dont l'état de contrainte a pu être modifié lors des excavations des fondations du barrage.

1.1.2 Fonction de l'ouvrage ; contexte hydrologique

Le lac-réservoir de Pannecière a été construit dans le double but d'écarter les crues de l'Yonne en période hivernale et de soutenir les débits restitués en aval en période estivale d'étiage.

Sur ces fonctions d'origine se sont greffées des fonctions complémentaires :

- produire de l'électricité, au moyen d'une usine EDF, située sous l'une des voûtes de l'ouvrage (production électrique moyenne de 14 GWh/an),
- assurer l'alimentation estivale du canal du Nivernais, par une rigole d'amenée prélevant les eaux en aval de la restitution,
- assurer l'alimentation en eau du syndicat local de distribution d'eau potable (SIAEPA), au moyen d'une prise d'eau située sur la vanne de garde de l'usine hydroélectrique. Le SIAEPA de Pannecière dessert une dizaine de communes.

Le bassin versant contrôlé par le barrage de Pannecière s'étend sur une superficie de 220 km². Le débit moyen de l'Yonne est évalué à cet endroit à 5,5 m³/s environ. La crue maximale connue s'est élevée à 82,5 m³/s (février 1999). Le débit d'étiage sans soutien peut être inférieur à 0,5 m³/s. La retenue, à son plan d'eau maximal (altitude 324 NGF), a une capacité de 82,5 hm³ et recouvre une superficie de 520 ha.

L'alimentation du canal du Nivernais représente actuellement 27 hm³ par an (1 m³/s à 1,4 m³/s, du 15 mars au 15 novembre).

1.1.3 Présentation des principales dimensions de l'ouvrage

Le barrage de Pannecière est un barrage à voûtes multiples d'une hauteur maximale sur fondation de 56 m, et de longueur totale 352 m. Il est formé de 12 contreforts d'appuis distants de 17,50 m et de 13 voûtes dont la génératrice est inclinée vers l'aval avec un fruit amont de 0,91 et un fruit aval de 0,875.

A chacune de ses deux extrémités, le barrage s'appuie sur une culée pleine. L'ouvrage est fondé sur une roche saine et compacte, qui assure l'étanchéité de la retenue. Au sommet du barrage, un pont-route assure le franchissement de l'ouvrage par une route départementale.

A leur base, les voûtes sont encastrées dans un massif d'appui dont la surface supérieure est en principe horizontale et présente des surfaces verticales planes. Le mur parafouille a une largeur de 4,50 m et une profondeur de 7 m environ. Il s'agit d'une tranchée linéaire, qui ne suit pas les courbures du barrage. Il est situé de telle sorte que la face amont du parement de l'ouvrage se trouve approximativement au droit de l'aval de ce parafouille au niveau des contreforts, et au droit de l'amont du parafouille en clef de voûte.

Les contreforts globalement triangulaires sont constitués de trois plots qui ont des épaisseurs comprises entre 2 et 3 m.

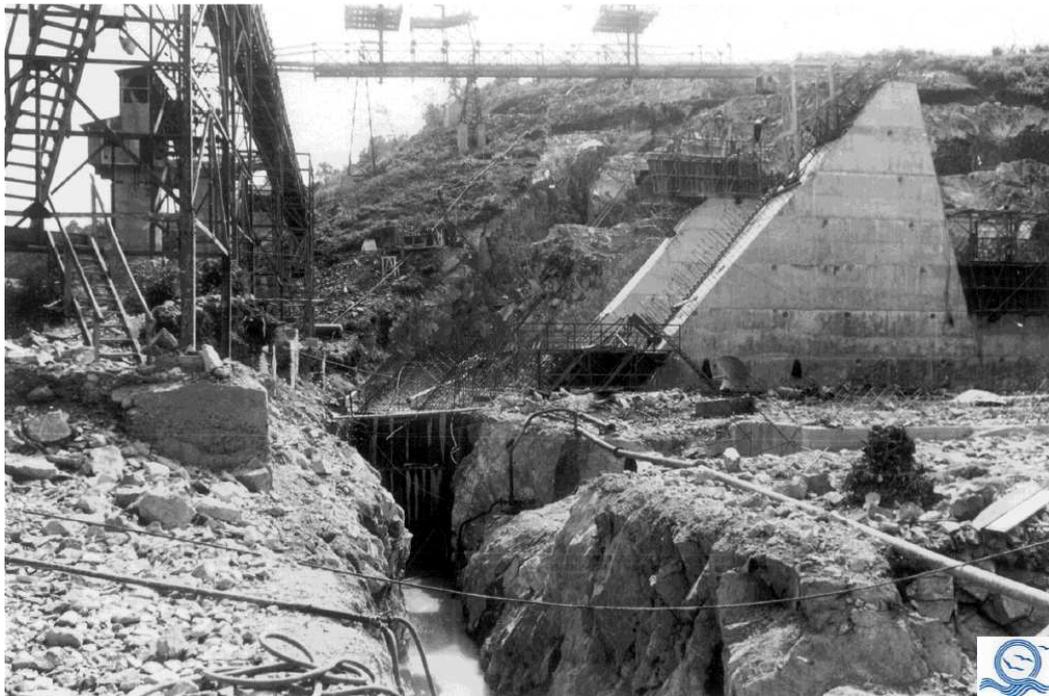


Figure 1 : Photo d'archives de l'EPTB-SGL prise lors de l'exécution du mur parafouille

1.2 Désordres constatés sur l'ouvrage et objectifs de l'opération de réhabilitation

Au cours de la vie de l'ouvrage, les surveillances et diagnostics réalisés ont révélé des comportements plus ou moins pathologiques, à savoir :

- un léger gonflement irréversible du barrage et une dérive vers l'aval, en raison d'un phénomène peu marqué d'alcali réaction,
- un réseau de fissuration, essentiellement vertical ou subvertical, visible à l'aval des voûtes, et dans une moindre mesure à l'amont,
- une fissure de pied horizontale au niveau des voûtes, vraisemblablement due à un contraste de raideur important entre la fondation immobile (parafouille) et les voûtes, soumises à un déplacement cyclique sous l'effet des variations de charges hydraulique et thermique,
- des venues d'eau dans des drains, notamment au niveau de la rive gauche,
- un risque de fragilité en cas de sollicitation sismique importante,
- des fuites au niveau des organes de vannage de la vidange de fond.

L'ensemble de ces analyses a conduit le Maître d'ouvrage à lancer un concours de Maîtrise d'œuvre pour la définition d'un avant-projet de réhabilitation par confortement, remporté en 2007 par Coyne et Bellier (devenu depuis Tractebel Engineering), consistant en une liste d'objectifs à atteindre et d'améliorations à apporter aux conditions d'exploitation du barrage et de la retenue. Le projet comprenait :

- la mise en œuvre d'un complexe d'étanchéité par géomembrane sur l'ensemble du parement amont du barrage permettant de stopper le phénomène de gonflement suspecté (alcali-réaction),
- l'injection des fissures à la résine permettant de restaurer le monolithisme de l'ouvrage, limité par la fissuration des voûtes (essentiellement localisée en parement aval),
- la réalisation de massifs de renfort en pied de voûtes, de manière à rendre plus progressive l'évolution de la rigidité entre la fondation et les voûtes pour supprimer l'évolution de la fissuration de pied des voûtes,
- la réalisation d'un nouveau rideau d'injection en continuité avec la bêche en pied amont du barrage, afin de limiter les venues d'eau dans les drains, ce qui nécessitait au préalable le rebouchage du drainage existant, et la réfection de celui-ci en fin de chantier,
- la réalisation de butons de contreventement entre les contreforts pour diminuer les déformations sous séisme de rive à rive afin de renforcer l'ouvrage sous sollicitation extrême,
- la réhabilitation des organes de vidange,
- le renforcement de l'auscultation, et l'amélioration des dispositifs de télétransmission des données d'auscultation.

Les travaux réalisés au cours de l'année 2012 ont permis de remplir la totalité de ces objectifs, à l'exception de la réhabilitation des organes de vidange, et de l'injection à la résine des fissures en aval des voûtes (ces opérations ont été différées).

Ces derniers travaux ne seront donc pas présentés ici, de même que les travaux d'injections et de renforcement de l'auscultation, dans la mesure où ils ne présentent pas de caractère d'originalité particulier (forages depuis l'amont et l'aval pour injections de la fondation du barrage, ajout de pendules directs et inverses, réalisation d'un rideau de drainage, ajout de vinchons et fissuromètres 3D télémétrés...).

1.3 Projet de réhabilitation : travaux à l'amont

Parmi les objectifs présentés plus hauts, l'application d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane constitue principalement le but recherché des travaux engagés à l'amont du barrage. Ces travaux nécessitaient au préalable :

- la réfection de la gunite : il s'agit d'une couche de béton projeté de 5 cm d'épaisseur, datant de la construction de l'ouvrage, et recouvrant la totalité du parement amont, afin notamment d'assurer une première étanchéité. Cette couche de gunite était localement décollée, souvent de plus d'un centimètre, ce qui était de nature à faire courir un risque sur la pérennité de la géomembrane à venir appliquer par-dessus ; la réfection a donc consisté en une démolition et réfection de la gunite dans les zones où celle-ci était décollée ;
- les travaux de désamiantage : avant de pouvoir entreprendre les travaux sur le parement amont du barrage, il a dû être procédé à l'enlèvement d'un revêtement bitumineux amianté, qui avait été appliqué comme revêtement de protection de la gunite.

L'ensemble de ces opérations préalables, à réaliser sur un parement d'une surface totale d'environ 20 000 m², avec une durée totale inférieure à 1 an, a conduit à rendre critique le planning général des travaux en amont.

Les autres opérations à réaliser à l'amont de l'ouvrage étaient :

- l'injection des fissures apparentes en surface (après désamiantage et enlèvement de la gunite),
- la réalisation par l'amont du renfort en génie civil sur la voûte comprenant la prise d'eau usinière (au lieu de le faire à l'aval, comme sur les autres voûtes),
- l'exécution d'une partie du rideau d'étanchéité prévu réalisé depuis l'amont (au niveau des voûtes situées en rive, ainsi qu'autour de la prise d'eau usinière).

1.4 Projet de réhabilitation : travaux à l'aval

Du côté aval, les travaux prévus comprenaient :

- l'exécution des massifs de renfort en pied des voûtes, pour atténuer le contraste de rigidité entre la fondation et les voûtes,
- la pose des butons préfabriqués de contreventement (hors voûtes d'extrémité où les butons ont été coulés en place).

Les déformations des voûtes étant d'ordre millimétrique, il était à craindre que les phénomènes de retrait de la contre-voûte à réaliser viennent empêcher cette dernière d'exercer un travail actif lors du recul des voûtes sous la pression de l'eau. C'est la raison pour laquelle le choix a été fait de couler les contre-voûtes au contact avec les voûtes, sans aucune disposition de liaison (aucune armature traversante). Le contact est en revanche assuré entre les massifs de renfort et les contreforts (arêtes marquées en bleu sur la Figure n°2). Le principe était de laisser le retrait et le refroidissement se faire sans bridage, créant un décollement entre la voûte et la contre-voûte. Ce décollement (évalué de l'ordre de 1 à 3 millimètres) devant être injecté au coulis de ciment en fin de chantier lors des opérations de clavage après expression du phénomène de retrait.

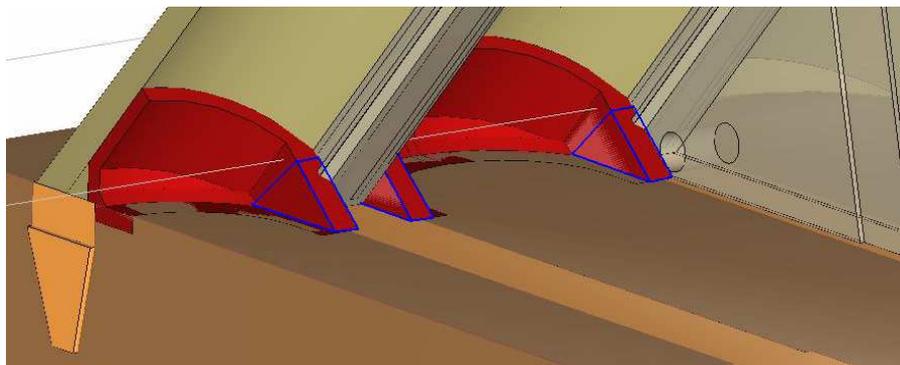


Figure 2 : Schéma des renforts aval en pied de voûte

Pour renforcer l'ouvrage en cas de séisme de rive à rive, l'exécution de deux rangées de butons de contreventement entre les contreforts a été réalisée comme indiqué en Figure 3.

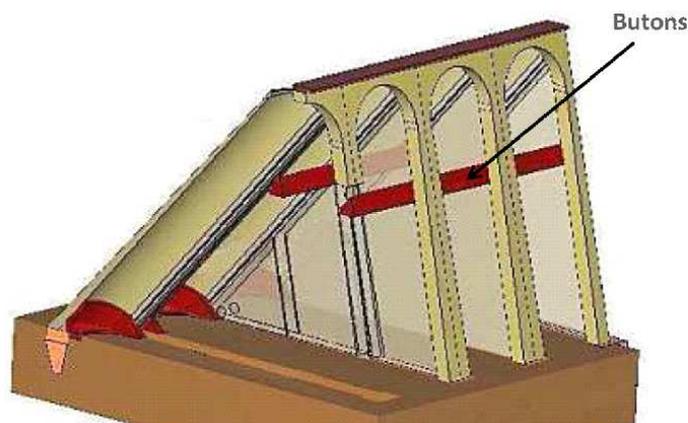


Figure 3 : Schéma des butons de contreventement entre les contreforts

2. DEROULEMENT DES TRAVAUX A L'AMONT

2.1 Moyens d'accès

La principale difficulté des travaux réalisés sur le parement amont a été les moyens d'accès : les voûtes mesurent environ 50 m de hauteur, avec un angle par rapport à l'horizontale proche de 45°. L'essentiel des zones du parement est donc impossible à atteindre par des nacelles télescopiques (depuis le bas) ou des nacelles inverses (depuis le haut) en raison d'un porte-à-faux trop important.

De plus, au niveau des voûtes situées en rives (appelées « voûtes biaises », soit 5 voûtes sur les 13), il n'y a aucun accès en pied pour des engins de chantier classiques (à roue ou à chenille).

La solution qui s'est imposée, a consisté à mettre en place des nacelles volantes, conçues spécifiquement pour s'adapter aux voûtes du barrage. Au niveau des voûtes biaises, le pied des voûtes n'étant pas accessibles aux nacelles (celles-ci devant rester horizontales), des échafaudages ont dû être mis en place.

De plus, au niveau de la voûte E (comprenant la prise usinière), empêchant les nacelles volantes de descendre, des dispositions spécifiques ont dû être prises :

- concernant le désamiantage, la réfection de la gunite, et le traitement de la surface de reprise (avant le génie civil du renfort) : des nacelles autoélevatrices ont été utilisées (il ne s'agissait que de travaux en pied des voûtes, et le porte-à-faux n'était donc pas trop important),
- concernant le génie civil du renfort : les systèmes de coffrages comprenaient leurs propres moyens de circulations et d'accès,
- concernant la mise en place de la géomembrane (après le génie civil du renfort), des échafaudages spécifiques ont dû être mis en place.

Seuls les systèmes de nacelles volantes, du fait des difficultés rencontrées, seront détaillés ici. Les difficultés relevant des interfaces avec les travaux d'accès (échafaudages notamment) seront traités séparément.



Figure 4 : Moyens d'accès au parement amont : nacelles autoélevatrices (à gauche), et échafaudages

2.1.1 Présentation des nacelles devant s'accommoder de la géométrie des voûtes

La géométrie des voûtes est particulièrement complexe : si la génératrice du côté aval est de forme cylindrique, la variation d'épaisseur des voûtes (qui passent de 1,8 m en pied à seulement 0,5 m en tête) crée

une géométrie variable du côté amont. En particulier, au niveau des contreforts, la distance entre deux voûtes adjacentes est de l'ordre de quelques mètres en tête, mais seulement de l'ordre de quelques décimètres en pied.

Cette géométrie a nécessité de concevoir des nacelles pouvant s'adapter, avec le tiers central « fixe », et les deux tiers extérieurs articulés par rapport à ce tiers central.



Figure 5 : Nacelle dans la position la plus basse, pendant les opérations de désamiantage

Malgré cette articulation, l'ensemble des voûtes n'étant pas rigoureusement identique, il n'a pas été possible de descendre les nacelles au pied des voûtes à chaque fois, comme on le voit sur la Figure n°5.

Un levé précis des voûtes a été réalisé par méthode lasergrammétrique, qui, après exploitation, a permis de modifier les nacelles, pour les rendre adaptables aux voûtes dans la mesure du possible ; les nacelles n'étaient plus interchangeables, certaines n'ont pu être utilisées uniquement sur certaines voûtes.

2.1.2 Longueur développée des nacelles, équilibrage des treuils

Les nacelles, conçues par la société spécialisée START, sont tractées au moyen de quatre treuils à câbles. Leur longueur totale développée est de 23 m, ce qui dépasse les références antérieures dont nous avons eu connaissance.

Cette longueur développée importante a posé des difficultés structurelles, conduisant dans un premier temps à des endommagements mécaniques de certaines pièces (les nacelles ont dû être arrêtées suite à ce constat). Les nacelles avaient une structure trop rigide pour permettre de s'assurer que les tensions s'équilibraient correctement dans les différents câbles, ce qui a conduit à des reports d'efforts excessifs vers certains des câbles, et donc à des efforts au-delà du dimensionnement dans certains éléments des structures des nacelles. Ce problème a été résolu principalement par la mise en place de commandes permettant de mieux assurer l'équilibre des efforts entre les différents câbles.

2.1.3 Imperfections géométriques des voûtes

Comme indiqué précédemment, le levé lasergrammétrique des voûtes a révélé localement des imperfections géométriques du parement, notamment sur la partie immergée, créant des hors-profils significatifs (sans doute dus à des mouvements du coffrage lors de la construction de l'ouvrage). Ces hors profils, qui dépassaient localement les 20 cm, ont pu être traités :

- par montage d'un échafaudage, ou par rehaussement de quelques mètres d'échafaudages déjà prévus pour le traitement des parties inférieures des voûtes,
- ou par découpage du plancher de circulation des nacelles, permettant de franchir le hors profil avec la nacelle, au moyen, parfois, de manœuvres délicates de celles-ci (notamment en les faisant se décaler de l'axe des voûtes par pilotage distinct des différents treuils).

2.2 Travaux de désamiantage

Les travaux de désamiantage, en raison des risques pour la santé des opérateurs, font l'objet de mesures de prévention strictement réglementées. Le choix a finalement été fait par l'entreprise de désamiantage

d'effectuer un rabotage de la peinture amiantée, avec une aspiration de forte puissance à la source, permettant d'éviter toute dispersion de fibres dans l'air ou sur les parements adjacents.

L'aspiration à la source, dont l'efficacité a dû être validée par des mesures de fibres dans l'air, a permis d'éviter la mise en place d'un confinement autour des nacelles, qui aurait été particulièrement complexe. En effet, outre les difficultés déjà rencontrées par les nacelles seules, se seraient présentées celles du confinement et de la stabilité au vent de l'ensemble « nacelle+ confinement ».

Les principales difficultés rencontrées dans la réalisation du chantier de désamiantage, outre celles liées aux accès, ou aux problèmes de coactivité, ont été les suivantes :

- la géométrie des voûtes a rendu impossible l'utilisation de raboteuses de grand diamètre, comme cela avait été dans un premier temps envisagé par l'entreprise (le rayon de courbure de la voûte ne permet pas de l'utiliser efficacement) ; l'ensemble de la surface à désamianter a donc dû être traitée au moyen d'équipements électroportatifs légers,
- en présence d'eau, la peinture s'humidifiait et colmatait rapidement les disques des outils de rabotage. Tous les travaux ont donc systématiquement dû être stoppés en présence de pluie, jusqu'à ce que le support puisse être asséché. Le chantier de désamiantage n'a pu débuter qu'au mois de janvier 2013, soit en pleine période humide.

Par ailleurs, au cours des travaux, il a été constaté un décollement spontané de la peinture amiantée lors de l'exposition à l'air après vidange de la retenue, principalement en présence d'un fort ensoleillement, ce qui témoigne de la fragilité de cette protection ancienne.

2.3 Réfection de la gunite

Lors de la construction de l'ouvrage, afin d'assurer l'étanchéité du barrage, notamment, vis-à-vis des possibles fuites à travers les reprises de bétonnage, une couche d'environ 5 cm d'épaisseur de mortier projeté (gunite) avait été mise en place sur l'ensemble du parement amont. Cette couche était fortement décollée, notamment en partie supérieure de l'ouvrage (périodiquement exposée au soleil lors des marnages de la retenue).



Figure 6 : Mise en évidence d'une portion de gunite décollée du parement amont

Dans un premier temps, il avait été imaginé de reconstituer la gunite en fonction d'un double critère de superficie de la zone décollée (supérieure à 2 m²), et d'ouverture du décollement. Toutefois, il a été constaté que le décollement variait très fortement en fonction de l'heure de la journée (pouvant passer d'un décollement inférieur au millimètre à un décollement quasi centimétrique). Il a donc été choisi de ne retenir que le critère de superficie des portions décollées pour décider des zones devant faire l'objet d'une réfection. En ce qui concerne le traitement des zones faisant l'objet d'une réfection, comme indiqué sur la Figure n°7, la question de l'accès à l'aide des nacelles volantes était particulièrement délicate pour la réalisation du béton projeté.

En effet, il était nécessaire de réaliser celui-ci de haut en bas, d'une part car il s'agit d'une bonne pratique pour ce type de travaux, et, d'autre part, les roues de la nacelle se trouvant en dessous de celle-ci, elles rouleraient inévitablement sur le béton tout juste réalisé si les travaux étaient effectués en remontant.

Le béton projeté a donc été réalisé en descendant, ce qui impliquait, une fois le béton projeté réalisé, qu'il n'était possible de quitter la nacelle que par en bas... Les nacelles ne pouvant le plus souvent pas descendre jusqu'en pied des voûtes, il était nécessaire de disposer d'une nacelle autoélevatrice au pied des voûtes, ne serait-ce que pour permettre aux personnes travaillant sur les nacelles roulantes de pouvoir quitter celles-ci.



Figure 7 : Mise en place de béton projeté au niveau des culées (à gauche) et sur une voûte (à droite)

2.4 Renfort amont (autour de la prise d'eau usinière)

Sur la voûte E, qui abrite l'usine hydroélectrique, un renfort a été réalisé à l'amont de l'ouvrage. Afin d'assurer le contact entre le renfort et la voûte d'origine, la surface a été traitée par hydrodécapage à très haute pression (2 350 bars), et des scellements réguliers ont été mis en place. L'ensemble du ferrailage a été mis en place dans un premier temps (hors aciers d'ancrages), puis le béton a été mis en place, par levées successives.



Figure 8 : Renfort amont – mise en place des armatures (à gauche) et décoffrage (à droite)

On voit bien sur cette photographie les difficultés supplémentaires créées par ce renfort au niveau des accès :

- d'une part, il est impossible de descendre les nacelles autoélevatrices sur la voûte E dès que le ferrailage est en place,
- d'autre part, il devient également impossible de descendre les nacelles autoélevatrices sur les deux voûtes adjacentes.

Dans ces conditions, l'ensemble des travaux sur les portions de voûtes mitoyennes au renfort amont a nécessité la mise en place d'échafaudages complémentaires en pieds de voûte.

2.5 Injection des fissures

Mise à part une fissure singulière au niveau de la prise d'eau usinière, qui a été injectée par une suspension de ciment, les fissures qui avaient été repérées au sommet des voûtes n'étaient en fait que des joints de reprise entre les nappes de gunite.

S'agissant des autres fissures visibles à l'amont, leur profondeur a été investiguée par enlèvement de la gunite, et il s'est systématiquement avéré que :

- soit la fissure ne concernait que la gunite, et ne se prolongeait pas au-delà, si ce n'est sur quelques centimètres au maximum,
- soit la fissure se trouvait dans la continuité d'une reprise de bétonnage légèrement ouverte ; dans ces cas, les intervalles (infra-millimétriques) étaient remplis de sédiments fins, les rendant non injectables.

Aucune opération d'injection à la résine n'a donc eu lieu sur le parement amont.

2.6 Dispositif d'étanchéité par géomembrane

2.6.1 Reconnaissances et traitements préalables

Les principaux risques de venue d'eau sont :

- un contournement de la fixation périmétrale de la géomembrane à travers le béton de l'ouvrage et plus particulièrement sous l'ancrage en partie basse des voûtes,
- des malfaçons au niveau des raccords ou fixations de la géomembrane,
- un endommagement accidentel de la géomembrane en exploitation (choc d'embâcles, coupure...).

Le risque le plus difficile à éliminer est le risque de contournement. Ainsi, dans la zone d'ancrage en pied de voûtes, la gunite a été entièrement enlevée dans toutes les zones où existait une suspicion de décollement (sans prise en compte du critère d'une surface minimale de 2 m²).

Par ailleurs, toutes les zones fissurées ont été investiguées et traitées par injection d'un enduit étanche spécifique.

La principale interrogation qui s'est posée au cours de l'exécution des travaux, a résulté de la découverte de nombreux tubes de forage, plongeant dans la tranchée du parafouille, et qui n'avaient pas été rebouchés lors de la construction du barrage (Figure n°9 illustrant la présence des tubes de forage retrouvée a posteriori dans les photos d'archives EPTB-SGL).



Figure 9 : Photo d'archives de l'EPTB-SGL des tubes de forage lors de l'exécution du mur parafouille

Ces tubes émergeaient généralement au pied des voûtes, parfois dans celles-ci. Compte tenu du risque d'introduire directement la pleine pression d'eau sous la tranchée parafouille, il aurait été légitime de reboucher l'ensemble de ces tubes. Toutefois, compte tenu de l'importance de ces travaux, le choix a été fait de ne reboucher que ceux dont le sommet émergeait sous la géomembrane, afin d'éviter que l'eau n'arrive sous celle-ci par ces tubes, qui, de plus, ne seraient plus accessibles. Les autres tubes demeurent accessibles lors d'une prochaine opération de vidange, en vue d'un possible rebouchage, si cela s'avérait nécessaire.

2.6.2 Mise en place de la géomembrane

La mise en place de la géomembrane a été réalisée par la société CARPI. Elle s'est faite par lés verticaux au niveau des culées, et par lés périmétraux au niveau des voûtes, qui constituent la principale difficulté au regard de leur géométrie complexe.

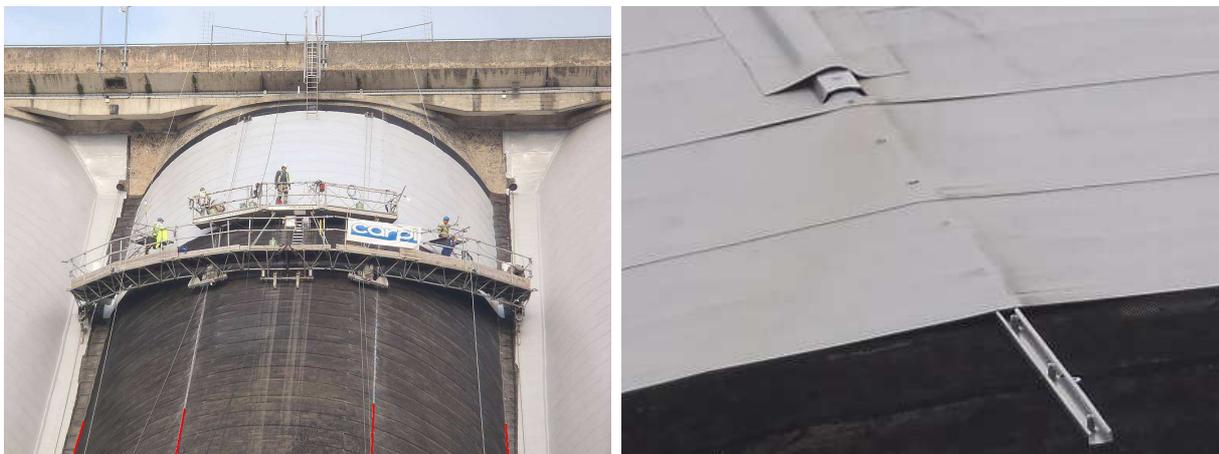


Figure 10 : Mise en place de la géomembrane – sur une voûte (à gauche), raccordement des lés (à droite)

La voûte est tout d'abord recouverte d'une géogrille drainante, d'environ 5 mm d'épaisseur. Cette géogrille est posée par lés périmétraux, d'environ 1 m de largeur. Sur cette géogrille sont posés quatre profilés de fixation, ancrés dans le béton (ils ont été surlignés en rouge dans leur partie inférieure, sur la photographie de gauche en Figure n°10). Les lés de géomembrane (largeur: 1,10 m) sont ensuite posés, également suivant les périmètres des voûtes. Un recouvrement de 10 cm est respecté d'un lé sur l'autre, avec une thermosoudure dans cette zone.

Pour assurer la mise en tension de la géomembrane, celle-ci est tout d'abord chauffée, puis, un second profilé est fixé sur le premier. Ce second profilé est ensuite recouvert par une géomembrane perpendiculaire aux lés courants, avant d'être thermosoudé sur ceux-ci (photographie de droite en Figure n°10).

Par ailleurs, avant la mise en place de la géomembrane à proprement parler, il est nécessaire d'installer un système d'aération et de drainage. Des carottages ont ainsi été réalisés sous chaque voûte, pour l'aération (en tête de voûte) comme pour le drainage (en pied de voûte). Ces dispositions permettront d'identifier approximativement la provenance d'une éventuelle fuite au travers du dispositif d'étanchéité.



Figure 11 : Drainage de la géomembrane en pied de voûte (à gauche) – carottage des aérateurs (à droite)

Afin d'éviter que la géomembrane n'ait à reprendre des efforts de pression de l'eau au niveau des drains, tout en permettant à l'eau de s'écouler facilement, une plaque de protection, en inox, a été mise en place sur chaque orifice de drain, avec une double épaisseur de géogrille de drainage intercalée entre le barrage et la plaque.

2.6.3 Difficultés de gestion des interfaces entre ateliers

Les interfaces entre les différents corps de métier ont été particulièrement délicates à gérer sur cet ouvrage, et plus particulièrement pour les travaux sur le parement amont. Les principales interfaces générant des situations complexes de coactivité sont les suivantes :

- interfaces entre les travaux de désamiantage et les échafaudages en pied de voûtes,
- interfaces entre les travaux de réfection de la gunite et la pose de la géomembrane,
- interfaces générées par les travaux du renfort amont sur l'ensemble des autres ateliers,
- interfaces générées par les carottages de reconnaissance sur l'ensemble des autres ateliers,

Ces interfaces auraient pu être gérées sans difficulté particulière s'il n'était pas survenu des événements extérieurs imposant de fait une coactivité intensifiée entre ces différents ateliers. Les événements extérieurs ont été :

- les crues de l'Yonne en décembre 2011 et janvier 2012, nécessitant la mise en place d'échafaudages supplémentaires et de moyens d'accès renforcés depuis le pont-route en crête du barrage,
- les intempéries limitant la cadence d'avancement des travaux de désamiantage obligeant la neutralisation des voûtes directement adjacentes pour préserver les opérateurs du risque de contamination par des fibres amiantées,
- Les difficultés de mise au point de la circulation des nacelles d'une telle longueur développée.

Afin de garantir le délai d'exécution des travaux avant la remise en eau du barrage, l'ensemble des événements extérieurs au chantier a conduit le Groupement d'entreprises à devoir superposer temporairement des tâches qui devaient initialement se succéder. Ainsi, il est arrivé que des opérations de réfection de la couche de gunite se déroulent aux côtés de voûtes ayant déjà été revêtues par la géomembrane (Figure n°4).

En ce qui concerne les incidences induites par le renfort de génie civil au niveau de la voûte E abritant la prise d'eau usinière, la circulation des nacelles sur cette voûte a été empêchée dès lors que les premières activités de génie civil ont été engagées, en raison des risques générés par les travaux en élévation. Il est également rappelé que la circulation des nacelles sur les deux voûtes adjacentes à la voûte E a également été rendue impossible en partie inférieure des voûtes, en raison de l'encombrement créé par les installations de génie civil au niveau des contreforts.

Malgré ces difficultés, les travaux sur le parement amont ont pu être achevés comme illustré sur la Figure n°12 à mi-décembre 2012 avec quelques jours de décalage par rapport à l'objectif du 1^{er} décembre 2012.



Figure 12 : Vue du parement amont du barrage après achèvement des travaux d'étanchéité

3. DEROULEMENT DES TRAVAUX A L'AVAL

3.1 Renforts de pieds de voûtes

3.1.1 Voûtes courantes : réalisation des renforts

Les renforts de pied de voûtes à l'aval ont été réalisés en plusieurs temps :

- élargissement du parafeuille, fondé au rocher (semelle de l'ouvrage, en béton peu ferraillé),
- bétonnage d'une première levée, de 1 m de hauteur,
- bétonnage de l'ensemble de la contre-voûte, en une fois, au moyen d'un béton sans vibration ; compte tenu de la forte poussée du béton sur le coffrage, le béton a dû être coulé lentement, lors d'opérations faisant l'objet d'une surveillance particulière.

Des hors profils du parement aval des voûtes ont posé des difficultés importantes : si le ferrailage pouvait s'adapter géométriquement sans grande difficulté, la présence d'un coffrage métallique unique, réalisé sur mesure et déplacé de voûte en voûte, a rendu impossible toute adaptation au contact des voûtes. Ces difficultés ont conduit à devoir, localement, mettre en place des surépaisseurs de béton moyennant l'application de treillis soudés, qui ne remettent pas en cause le fonctionnement structurel de la contre-voûte.



Figure 13 : Exécution des renforts (voûtes droites) – pose du ferrailage (à gauche), du coffrage (à droite)

3.1.2 Injections de clavage

Le principe de fonctionnement de ces renforts implique que du coulis de ciment doit être injecté à l'interface entre la voûte et la contre-voûte ; l'opération de clavage a fait l'objet de dispositions préalables rendues nécessaires pour contrôler la bonne exécution de ces injections :

- des cornières d'injection ont été mises en place au pied des voûtes : il s'agit de cornières sur lesquelles des armatures avaient été soudées, afin de les rendre solidaires de la contre-voûte ; elles ont été positionnées de manière à créer une réserve contre la voûte existante, et le contact entre cette cornière et la voûte a été assuré par du mortier prompt, permettant d'assurer l'étanchéité suffisante pour éviter que la laitance du béton ne remplisse la réserve ; un tuyau a été disposé sortant de cette réserve, jusqu'à une réservation positionnée contre le coffrage,
- un dispositif analogue a été positionné au sommet de la contre-voûte, de manière à servir d'exutoire au coulis, lors de l'injection,
- un joint hydrogonflant, complété parfois par un joint waterstop, a été positionné autour de la zone devant contenir le coulis, afin de confiner celui-ci.

Le principe de l'injection était, dans un premier temps, d'effectuer un essai à l'eau, puis d'injecter un coulis de ciment par les différents événements situés en partie inférieure. Compte tenu d'une probable décantation du coulis pendant l'opération d'injection, il était prévu que les densités des coulis recueillis à l'exutoire en partie supérieure seraient périodiquement mesurées, l'opération d'injection se poursuivant jusqu'à ce que les densités recueillies au niveau de la collectrice soient similaires à celles qui étaient injectées en pied.

Par ailleurs, afin de s'assurer qu'il ne risquait pas d'y avoir d'endommagement de la voûte existante en raison de la poussée du coulis, la pression d'injection ne pouvait pas dépasser la pression strictement nécessaire pour annuler les effets gravitaires. A cet effet, des dispositifs, dans le principe, analogues à des « cheminées d'équilibres » ont été mis en place sur la ligne d'injection : embranchement de la ligne d'injection, avec un exutoire libre positionné environ 20 cm plus haut que la collectrice.

Cette opération d'injection, assez originale, et sur laquelle des craintes subsistaient sur sa faisabilité, s'est parfaitement bien déroulée. Toutefois, la forte porosité du béton de l'ouvrage d'origine, notamment au niveau des reprises de bétonnage, a laissé de nombreuses possibilités de contournement du coulis lors de l'injection, bien que le ciment utilisé fût pourtant un ciment courant, non surmoulu. Cela a conduit à injecter des quantités de coulis sensiblement supérieures à ce qui avait été prévu ; les quelques résurgences qui ont été observées, se sont toutes colmatées au cours de l'opération d'injection, la viscosité du coulis utilisé (avec un rapport C/E supérieur ou égal à 1 et un ciment sans additif) étant suffisamment importante.

3.1.3 Renforts en pied des voûtes : cas particulier des voûtes biaises (en rive)

Dans le cas des voûtes biaises, le rocher de fondation n'étant pas horizontal à l'origine, la solution qui avait été retenue était de mettre en place un béton de remplissage pour se substituer au rocher, et de mettre en place le renfort au sommet de la même manière que sur les voûtes courantes, comme présenté en Figure n°14. Pour l'accès, le choix réalisé par l'entreprise a été de remblayer progressivement au fur et à mesure de la montée du béton de remplissage, et de créer des pistes d'accès en remblai pour permettre la manutention du même coffrage que sur les autres voûtes.



Figure 14 : Renfort en pied de voûte L – configuration avant travaux (à gauche) et après travaux (à droite)

Sous une des voûtes, il a été constaté que le rocher sain, dont on pensait avoir bien identifié le toit avant le début des travaux, contenait en réalité une brèche, dont la présence peut être expliquée par un passage plus schisteux dans le substratum granitique et qui a nécessité des purges complémentaires, comme indiqué en Figure n°15.



Figure 15 : Présence d'une veine de schistes dans le substratum granitique, purgée en rive droite

3.2 Renforcement sismique : les butons

Des butons de renforcement sismique ont été mis en œuvre entre les contreforts, à raison de deux butons par voûte. Ces butons sont destinés à limiter les déplacements des contreforts perpendiculairement à leur plan en cas de séisme. Les deux rangées de butons sont ancrées dans les rives de part et d'autre.

Afin de limiter les efforts (particulièrement les tractions) dus aux variations saisonnières de température, les butons ont été réalisés avec des dispositions constructives leur permettant de se contracter légèrement en cas de refroidissement.

Le joint entre la zone de clavage et le buton préfabriqué est destiné à pouvoir s'ouvrir, de manière à ne pas solliciter la résistance à la traction du béton dans cette zone. Afin de permettre à ce joint de s'ouvrir suffisamment pour contrôler les tractions, aucune des armatures traversant ce joint n'est adhérente au béton de part et d'autre. Les armatures qui traversent ce joint (« armatures de continuité », soit 4 HA25) ont été réalisées en acier inoxydable, et positionnées dans des gaines injectées de graisse sur une longueur de 1 m à l'intérieur du buton. Les armatures ont été positionnées dans le buton préfabriqué, et transmettent leurs efforts dans la zone de clavage de l'autre côté, à des armatures ancrées dans les contreforts.

La reprise des efforts de cisaillement (poids du buton, et déplacements amont-aval) au niveau de ce joint est faite au moyen de goujons de cisaillement en acier inoxydable.



Figure 16 : Pose des butons préfabriqués dans les voûtes courantes

Au niveau des deux voûtes d'extrémité, des culées ancrées au rocher ont été réalisées, et les butons coulés en place entre ces culées et les premiers contreforts.

4. CONCLUSIONS ET RETOUR D'EXPERIENCE

Les principales difficultés rencontrées lors des travaux de réhabilitation du barrage de Pannecière ont été de deux ordres :

- les conditions hydrauliques et météorologiques, qui ont perturbé le déroulement des travaux sur le parement amont,
- les difficultés d'accès, qu'il s'agisse des voûtes biaises à l'aval, des culées à l'amont, ou de la circulation des nacelles sur le parement amont.

Il est remarquable de constater que les aléas liés à l'ouvrage à proprement parler n'ont pas eu de conséquences majeures :

- les plus importants hors profils rencontrés sur le parement amont des voûtes l'ont été dans les parties basses de l'ouvrage, ce qui a permis d'intervenir depuis le bas par des échafaudages,
- Les irrégularités géométriques du côté amont à niveau intermédiaire ont pu être contournées grâce à l'adaptabilité des nacelles,
- Les irrégularités géométriques du côté aval ont été traitées, avec un coffrage unique, en jouant sur l'épaisseur des renforts (entraînant des sur ou sous épaisseurs des renforts).

Néanmoins, il peut être retenu rétrospectivement, que les travaux auraient pu être perturbés significativement si un hors profil important au niveau du parement amont avait bloqué le passage des nacelles en partie supérieure d'une voûte courante ; il aurait alors potentiellement été nécessaire d'échafauder toute la voûte.

Ce retour d'expérience peut contribuer à alerter les Maitres d'ouvrage, leurs assistants, et les Maitres d'œuvre, sur la nécessité, pour des travaux de réhabilitation lourde, de :

- se libérer des contraintes de délai trop rigides et se constituer une provision de temps pour aléas : crues, intempéries, difficultés d'accès...,
- procéder aux repérages géométriques complets avant travaux des ouvrages existants avec densification des reconnaissances, même si ces ouvrages s'avèrent a priori bien documentés, et profiter des vidanges décennales pour procéder à des reconnaissances visant à accroître la connaissance sur l'ouvrage pour des travaux ultérieurs,
- réduire au minimum les interfaces entre les opérations d'exploitation de l'ouvrage et les travaux.