

## Réhabilitation du barrage de Pannecière (Nièvre) : contraintes environnementales liées aux travaux

### *Rehabilitation of Pannecière Dam: environmental context related to civil works*

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

Antoine Escalas, Céline Roche, Eric Boidy, TRACTEBEL ENGINEERING  
Le Delage – 5 rue du 19 mars 1962 - 92622 Gennevilliers – FRANCE  
Antoine.Escalas@gdfsuez.com, Celine.Roche@gdfsuez.com, Eric.Boidy@gdfsuez.com

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

### MOTS CLES

Barrage, réhabilitation, réglementation, Morvan, crues, batardeau, loi sur l'eau, eau brute, sédimentation, matières en suspension.

### RÉSUMÉ

*L'Établissement Public Territorial de Bassin Seine Grands Lacs (EPTB SGL) est Maître d'Ouvrage du barrage de Pannecière, situé sur l'Yonne, dans le massif granitique du Morvan. Cet ouvrage a fait l'objet d'une importante opération de réhabilitation par confortement en 2011 et 2012.*

*Cette opération a été soumise à de nombreuses contraintes extérieures pendant les travaux, notamment la nécessité d'assurer une continuité des missions de soutien d'étiage de l'Yonne et d'alimentation en eau brute pour l'usine de traitement du SIAEPA alimentant en eau potable les communes avoisinantes.*

*En outre, ces travaux ont fait l'objet d'importantes mesures de suivi environnemental, notamment vis-à-vis des milieux aquatiques situés à l'aval.*

*La présente communication s'intéresse au retour d'expérience des mesures d'accompagnement des travaux, y compris la description des aléas et imprévus survenus pendant la réalisation des ouvrages connexes nécessaires à l'exécution des travaux de réhabilitation.*

### 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 civil works has been performed in 2011 and 2012.*

*The project was subject to many external constraints during the works, including the need to ensure continuity of the mission of low flow support of the Yonne River and the need to ensure continuity of raw water supply for the water treatment plant in neighboring municipalities.*

*In addition, these works have been performed under control by environmental monitoring, particularly concerning impacts on the aquatic environment located downstream.*

*This communication is interested in feedback from accompanying measures work, including a description of the contingencies occurring during the implementation of related works necessary to carry out rehabilitation work.*

## 1. PRINCIPAUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX DU CHANTIER

Le barrage de Pannecière est le premier ouvrage de régulation de l'Yonne, dans le massif hercynien du Morvan. Son bassin versant est d'une superficie de 220 km<sup>2</sup>, et d'une longueur inférieure à 30 km. Le débit moyen (annuel) de la rivière est de 5,5 m<sup>3</sup>/s, avec des débits d'étiage pouvant avoisiner les 0,2 m<sup>3</sup>/s, et des débits de crue à plus de 100 m<sup>3</sup>/s.

Le barrage de Pannecière remplit de multiples fonctions :

- Sa mission principale : contribuer à la protection de l'Yonne, et de la Seine, vis-à-vis des crues, et assurer un soutien en période d'étiage, de manière à garantir dans la rivière un débit de 0,7 m<sup>3</sup>/s,
- Permettre la production d'électricité, grâce à l'usine EDF construite sous l'une des voutes du barrage,
- Sécuriser l'alimentation en eau du canal du Nivernais (dont la prise d'eau se trouve au niveau du bassin de compensation EDF en aval), qui nécessite un débit allant jusqu'à 1,5 m<sup>3</sup>/s,
- Assurer l'alimentation en eau brute du syndicat des eaux local (SIAEPA), qui est branché à l'aval de la vanne de garde de l'usine EDF,
- Développer l'activité touristique autour de la retenue, avec notamment une activité de pêche renommée (carpes, sandres...) constituant un enjeu économique fondamental pour les communes avoisinantes.

Une importante campagne de réhabilitation du barrage par confortement a été menée en 2011-2012, nécessitant une mise à sec prolongée de la retenue en amont. Toutefois, l'ensemble des fonctions que remplissent le barrage et le réservoir de Pannecière n'a pas pu être interrompu totalement pour la durée des travaux, ainsi :

- Si la mission de protection contre les crues n'a pas pu être assurée en revanche, le maintien en période estivale du soutien d'étiage des débits de l'Yonne a dû être garanti,
- La sécurisation de l'alimentation en eau du canal du Nivernais a, elle aussi, été demandée maintenue,
- La continuité de l'alimentation en eau potable du syndicat des eaux (SIAEPA) a dû être assurée moyennant des travaux complémentaires,
- Enfin, si l'activité de pêche a dû être interrompue pendant les travaux en amont, la nécessité de procéder, lors de la remise en eau, au rempoissonnement dans les meilleures conditions a nécessité une coordination étroite avec les associations de pêche.

Par ailleurs, l'impact strictement environnemental du chantier, et particulièrement lors de la vidange initiale du réservoir, a fait l'objet de mesures particulières de sauvegarde et de surveillance.

## 2. MISSION DE SOUTIEN D'ETIAGE : REALISATION DU BATARDEAU

### 2.1 Enjeux, contexte, et conception initiale

La fonction de soutien d'étiage impose qu'une réserve d'eau soit constituée tous les ans avant l'été, en vue d'être progressivement restituée jusqu'au mois d'octobre. Afin de garantir la continuité de la fonction de soutien d'étiage pendant les travaux, un batardeau en terre a dû être réalisé en amont du barrage.

Une étude hydrologique a mis en évidence qu'une réserve d'eau de 2 millions de mètres cubes environ suffisait à assurer un soutien d'étiage minimal.

Par ailleurs, compte tenu des caractéristiques hydrologiques du bassin versant, il a été jugé nécessaire d'assurer une protection du chantier vis-à-vis des crues estivales (faisant suite à des phénomènes de type orageux, générant des « coups d'eau » en rivière). Le volume permettant d'assurer le laminage des crues de période de retour 50 ans sans dépasser les débits maximum autorisés en aval est de 2,3 millions de mètres cubes.

Plusieurs solutions avaient été envisagées en phase d'avant-projet, pour constituer le stock de 4,3 millions de mètres-cubes au total, comme de mettre en place une ou plusieurs digues en queue de retenue, associée à une digue de taille modeste au niveau du barrage. La solution retenue a été celle d'une retenue unique située en amont immédiat du barrage, avec pour double fonction de protéger le chantier vis-à-vis des crues et d'assurer une réserve de soutien d'étiage.

Le batardeau ainsi conçu atteignait une hauteur légèrement supérieure à 10 m, à la cote 293.4 (cote de la plate-forme située devant le barrage : 283, pour une cote du rocher au niveau du barrage à 276).

Les éléments qualitatifs disponibles lors de la conception sur la qualité de la plate-forme indiquaient que :

- le matériau avait une bonne portance, car il ne présentait aucun signe de matelassage sous le passage de poids lourds,
- les perméabilités, si elles étaient importantes, avaient néanmoins permis une mise à sec du pied de l'ouvrage (5 m sous le niveau de l'eau) lors des précédentes vidanges décennales.

Par ailleurs, la faible distance entre la prise d'eau des bondes de fond et le pied du barrage imposait de limiter l'emprise de l'ouvrage (Figure 1), conduisant au choix de conception suivant, à adapter en fonction des reconnaissances prévues au début des travaux :

- ouvrage en remblai, constitué en enrochements en rive gauche, afin de raidir les talus (pour limiter l'emprise), et fondé sur la plate-forme existante, après décapage superficiel,
- coupure étanche à l'aide d'un rideau de palplanches situé sous le pied amont du barrage,
- continuité de l'étanchéité assurée par un dispositif d'étanchéité par géomembrane, lié aux palplanches par l'intermédiaire d'une poutre de couronnement.

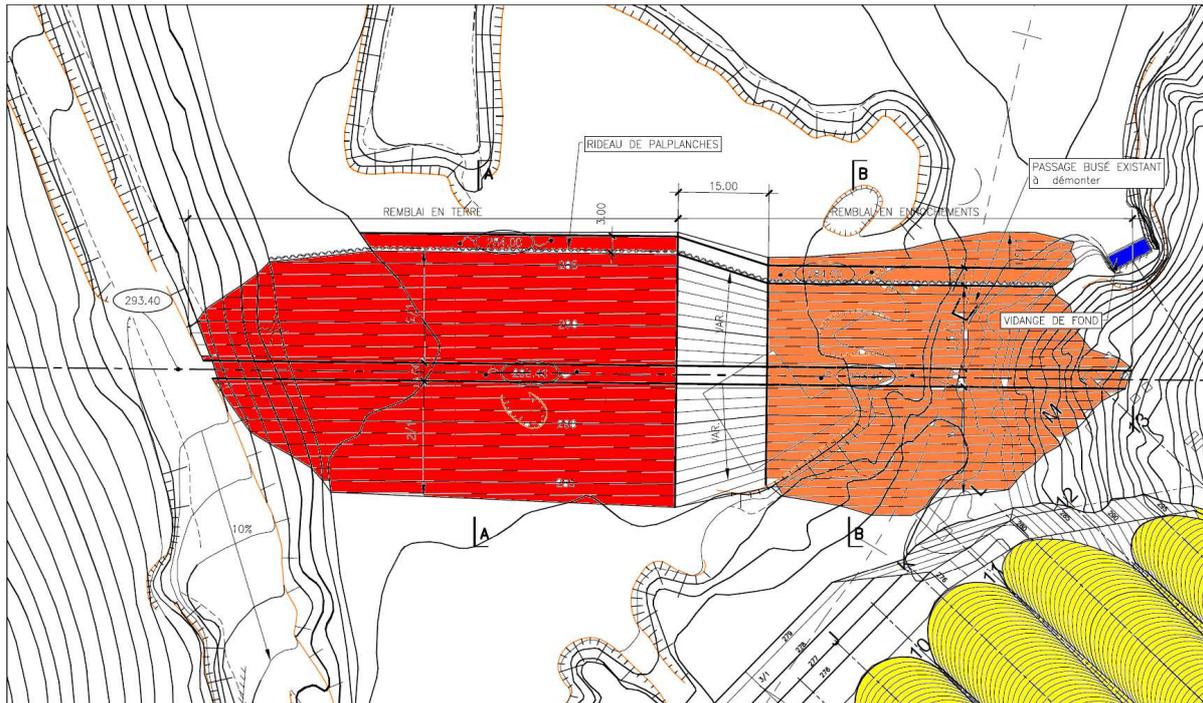


Figure 1. Vue en plan de l'implantation du batardeau du projet avec talus raidis en rive gauche (pied du barrage existant en aval)

La principale contrainte portant sur le démarrage de la construction du batardeau résidait dans l'impossibilité de débuter les travaux (et les reconnaissances des terrains de fondation) avant le 1er novembre 2011 pour raison de soutien d'étiage. Quant à l'achèvement de ces travaux, la nécessité de redispenser d'une réserve de soutien d'étiage au plus tard fin juin 2012, a conduit à garantir les conditions de son remplissage au plus tard à mi-mai 2012. Les travaux de construction du batardeau ont donc été contraints d'être impérativement exécutés entre le 1er novembre 2011 et le 15 mai 2012 en intégrant toutes les provisions pour gestion des crues et aléas géotechniques.

## 2.2 Fourniture de matériaux, carrière

Lors de la phase de conception, la solution privilégiée pour la fourniture de matériaux était une carrière située dans la retenue, qui avait été identifiée à environ 2 km de l'ouvrage sur la rive gauche (l'accès au pied du barrage se faisant par la rive droite).

Cette carrière a fait l'objet d'une procédure d'autorisation ICPE, fixant les limites de son périmètre. La phase de conception avait inclus des reconnaissances préliminaires, qui avaient indiqué la présence d'arènes granitiques sur quelques mètres d'épaisseur, avec un substratum rocheux à faible profondeur (la roche affleurerait à quelques dizaines de mètres du périmètre de la carrière).

Les quantités extrapolées avaient été jugées suffisantes pour assurer la fourniture en matériaux meubles et en enrochements (au moyen d'une station de concassage-criblage) pour les deux zones du batardeau.

Les reconnaissances approfondies menées au début du chantier ont révélé que le niveau qui avait été initialement identifié comme toit rocheux (issue d'une corrélation entre les mesures géophysiques et les sondages à la pelle)

n'en était en fait pas un. La frange d'altération des granites s'est révélée très hétérogène et globalement plus profonde que prévue par les résultats des sondages.

Le rocher sain se trouvait à une profondeur telle que son exploitation n'était pas envisageable.

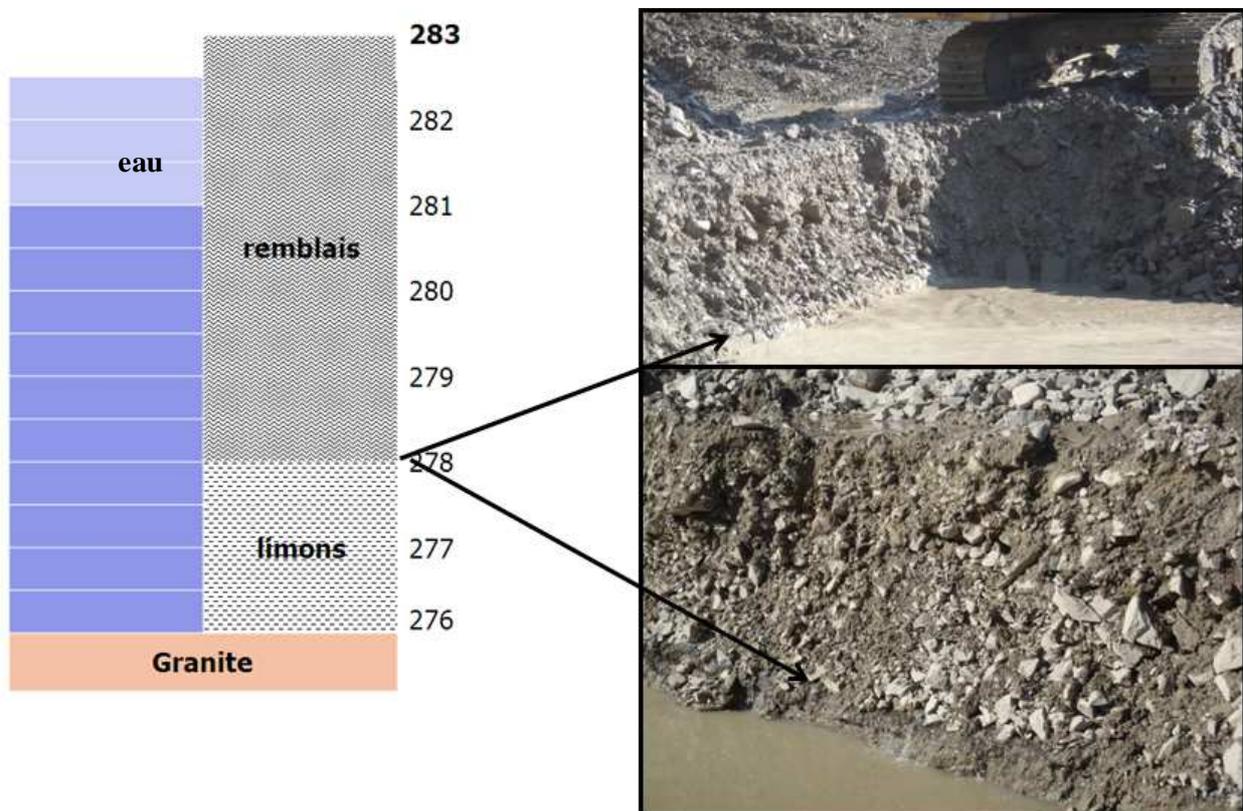
Afin d'éviter un approvisionnement d'enrochements depuis une carrière extérieure, le traitement des arènes granitiques avec un liant routier a été étudié en phase d'exécution. Cette alternative présente l'avantage de pouvoir réemployer les matériaux du site pour la réalisation du batardeau et de pallier la mise en oeuvre d'enrochement dans sa partie rive gauche nécessitant un raidissement des pentes de talus.

### 2.3 Reconnaissances au niveau de la fondation du batardeau

Les reconnaissances géotechniques n'ayant pas pu être menées avant la mise à sec en novembre 2011, la première information n'a pu être obtenue qu'à la fin de la vidange complète de la retenue. L'identification de la présence d'un rideau de palplanches existant, situé sous la recharge aval du batardeau tel que prévu, pouvait indiquer que les perméabilités naturelles des terrains, qui avaient été prises pour hypothèse sur la seule base du retour d'expérience lors des vidanges décennales, étaient exagérément optimistes...

Par la suite, des sondages à la pelle, des sondages destructifs, des sondages pénétrodynamiques, et des essais Lefranc ont révélé : la présence (entre les cotes 281.5 et 283 environ) d'une couche supérieure de remblais de bonne compacité ; en dessous 3 à 4 mètres de remblais peu compacts ; puis 2 mètres de limons de très faibles caractéristiques mécaniques. Les essais Lefranc n'ont pas permis de mesurer de perméabilité, aucune remontée d'eau n'ayant été constatée sous pression atmosphérique, jusqu'au débit maximum de la pompe...

La nécessité de décaisser ces matériaux meubles a donc pu être déduite immédiatement, mais, la bonne compréhension « géologique » du terrain n'a pu être parfaitement appréhendée que lors du décaissement (Figure 2). En effet, les deux mètres inférieurs correspondaient au terrain naturel avant la construction du barrage, terrains, sur lesquels ont été déposés des résidus de carrière (blocs décimétriques de granite), sans enlèvement de la végétation d'origine, d'où la présence non négligeable de bois et de matière organique à l'interface. De la vase avait par ailleurs sédimenté sur ces enrochements non compactés, les rendant très difficilement traficables sous la carapace de la partie supérieure. Cette stratigraphie atypique explique les perméabilités non mesurables dans les remblais (valeur estimée supérieure à l'unité suite aux essais de pompage).



**Figure 2.** Coupe de la fondation

*A gauche : amplitude de niveau d'eau habituelle (hors crues) ; à droite, transition limons/remblais.*

## 2.4 Conception définitive du batardeau

### 2.4.1 Etude de traitement au liant

Les arènes granitiques sont de nature sablo-argileuse de classification B5 selon le Guide des Terrassements Routiers. Leur teneur en eau naturelle est de l'ordre de 15 à 20%, pour une teneur en eau à l'optimum Proctor proche de 15%. La perméabilité mesurée en laboratoire dans ces conditions est de  $6,2 \cdot 10^{-5}$  m/s.

Ces matériaux peuvent être jugés adaptés au traitement aux liants hydrauliques (en s'inspirant de la norme la norme NF P 94-100), moyennant des précautions particulières. Les résistances mécaniques en traction  $R_{tb}$  et compression  $R_c$  avec 4% de liant en dosage pondéral (Tableau I) ont été considérées comme suffisantes dès lors que les contrôles en phase d'exécution permettaient de garantir la teneur en eau optimale et l'homogénéité du traitement des matériaux en déblais.

| Dosage en liant | Gonflement volumique à 7 jours d'immersion | $R_{tb}$ (MPa) à 7 jours | $R_c$ (MPa)                                    | Module E (MPa) | Perméabilité (m/s)                     |
|-----------------|--|--------------------------|--|----------------|--|
| 5%              | 1.71%                                      | 0.23                     | -  | 3149           | $7.6 \times 10^{-7}$                   |
| <b>4%</b>       | <b>1.80%</b>                               | <b>0.19</b>              | <b>0,80 à 2 jours</b><br><b>1,09 à 7 jours</b> | <b>2814</b>    | <b><math>1.4 \times 10^{-6}</math></b> |
| 3%              | 1.64%                                      | 0.14                     | -  | 2478           | $5.3 \times 10^{-6}$                   |

Tableau I. Résultats des essais de traitement à différents dosages en liant (Ligex PR)

### 2.4.2. Définition de la géométrie de l'ouvrage

La géométrie globale de l'ouvrage est restée proche de celle prévue en phase de projet : l'axe n'a que très légèrement été modifié, la pente de talus est resté à 3H/2V en rive gauche. En revanche, la partie centrale et la partie située en rive droite ont vu leurs talus passer de 2H/1V (initialement prévu) à 3H/2V. L'intérêt de cette modification est d'une part de diminuer les volumes de remblai, qui seraient devenus considérables, mais aussi de réduire la durée des travaux.

Par ailleurs, dans un souci d'optimisation des délais et des coûts, il a également été choisi de mettre en place en partie centrale du batardeau des arènes granitiques non traitées.

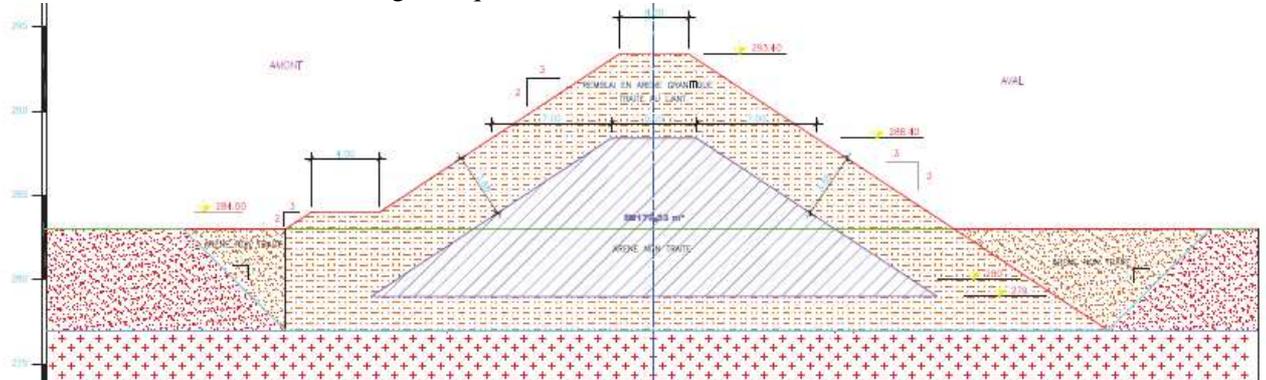


Figure 3. Coupe type du batardeau

### 2.4.3. Traitement des questions sur l'étanchéité et le drainage

La réalisation de l'ouvrage en matériaux traités a également permis d'envisager la suppression de la géomembrane initialement prévue, permettant de limiter le surcoût de l'ouvrage et les délais de réalisation.

Le traitement au liant permet de diminuer la perméabilité du matériau en place d'un peu plus d'une puissance de dix par rapport au matériau non traité (cf. §2.4.1). Toutefois, en absence de géomembrane, l'intuition de l'ingénieur conduit naturellement à recourir à un système de drainage à disposer sous la recharge aval, d'autant plus que dans la nouvelle configuration le parement aval était plus étanche que le noyau, ce qui est contraire aux règles de l'art...

Cependant, la mise en place d'un tel système de drainage aurait conduit à l'impossibilité pour le batardeau de travailler dans les deux sens, et donc la nécessité de prévoir un dispositif de vidange en cas de remplissage du volume entre le batardeau et le barrage. Par ailleurs, elle aurait également imposé des dispositions constructives incompatibles avec la nécessité de minimiser la durée de réalisation des travaux.

Après réflexions, il a finalement été considéré que ni l'étanchéité ni le drainage n'étaient nécessaires, compte tenu des très bonnes caractéristiques -essentiellement mécaniques- du matériau :

Il devenait en effet possible de se dispenser de la géomembrane compte tenu de l'absence de risque d'érosion interne du matériau traité,

L'hypothèse la plus pessimiste (parement amont et noyau perméables ; parement aval imperméable) a été retenue pour vérifier la stabilité de l'ouvrage.

#### 2.4.4. Principes de dimensionnement adoptés

Les matériaux utilisés pour la construction du batardeau étant proches d'un remblai, mais avec des caractéristiques plutôt fragiles que ductiles, le rapprochant davantage d'un ouvrage rigide (béton), il est légitime d'identifier au préalable le type de calculs approprié à retenir pour son dimensionnement. Il semble évident que la question de la justification au renversement ou au glissement ne se pose pas de la même manière que dans le cas d'un barrage poids, ne serait-ce qu'en raison de la géométrie de l'ouvrage. Il apparaît également évident que la stabilité intrinsèque des talus soit vérifiée.

Toutefois, deux questions pourraient, dans l'absolu, se poser pour ce type d'ouvrage : la justification thermique d'une part, et la nécessité d'une modélisation numérique permettant de prendre en compte les déformations d'autre part.

Intérêt d'un calcul aux éléments finis : la nécessité lors du chantier de purger systématiquement les terrains meubles pour venir fonder le batardeau sur le rocher a finalement conduit à peu solliciter l'ouvrage en déformations. D'autre part, la structure du « noyau » en arènes non traitées est suffisamment compactée pour présenter un module suffisant, compte tenu de sa faible hauteur, pour limiter les déformations. Dans ces conditions, il n'a pas été jugé nécessaire d'avoir recours à une modélisation numérique pour le calcul des déformations. Cette conclusion aurait été différente si le batardeau avait dû être fondé sur des sols de raideur comparable ou plus faible que le matériau traité.

- Problèmes thermiques : Il s'agit ici d'un matériau qui, comme le béton, fait prise, au cours d'une réaction exothermique ; le refroidissement du matériau entraîne un retrait, potentiellement créateur de fissuration. Aucun calcul thermique n'a été mené ici, l'expérience de l'entreprise montrant qu'il n'y avait pas de fissuration pour des dosages en liant de 4%, ce qui a été confirmé sur site. L'analyse des calculs thermiques pour la prédiction de la fissuration n'est par ailleurs pas non plus aisée.

## 2.5 Réalisation de l'ouvrage

Les principales difficultés au démarrage des travaux ont été :

- les crues, qui ont entièrement noyé le chantier pendant les mois de décembre 2011 et janvier 2012,
- la nécessité de procéder à un décaissement profond, sous le niveau de l'eau, dans des sols extrêmement perméables et difficilement circulables, à l'exception de la couche supérieure. Il a notamment été nécessaire de mobiliser d'importants moyens de pompage, afin de pouvoir procéder au décaissement, et cela malgré la réalisation d'une coupure au moyen d'un rideau de palplanches.

Par ailleurs, le chantier a dû faire face à :

- une forte vague de froid en février 2012 (températures entre -10°C et -20°C pendant 3 semaines),
- des venues d'eau importantes au niveau de la carrière, qui ont conduit à creuser des fossés de drainage, pour que la teneur en eau des matériaux n'excède pas 2% au-dessus de l'optimum Proctor,
- des matériaux à décaisser fortement imprégnés de vase, les rendant peu traficables, et ayant à plusieurs reprises nécessité la réalisation de remblais temporaires pour assurer la traficabilité des zones à décaisser...

La carrière a été divisée en deux zones, séparées par un fossé de drainage (Figure 4 à gauche ci-dessous), le traitement au niveau de la carrière s'est réalisé dans deux emprises relativement exigües :



Figure 4. De gauche à droite : fossé de drainage ; traitement ; chargement du matériau traité.

Au niveau de la réalisation des remblais, à proprement parler, la technique de mise en œuvre retenue était relativement classique : compactage par couches de 40 cm, avec 3 passes de V5, puis 2 passes de VP5 (pour assurer l'accrochage des couches). L'objectif était d'obtenir un taux de compactage supérieur à 95% de l'optimum Proctor normal.



Figure 5. A gauche : 1<sup>ère</sup> couche de remblais ; à droite : remblais du premier tiers inférieur du batardeau

Les seules réelles spécificités par rapport à un remblai classique sont le talutage, le rouleau à pied d'âne, et surtout la variation de largeur de la zone de travail, qui devient très étroite au fur et à mesure de la montée du batardeau :



Figure 6. De gauche à droite : reprofilage du talus ; empreinte du pied d'âne ; dernières couches de remblai

Les cadences de mise en œuvre des remblais étaient au maximum de 3 000 m<sup>3</sup>/j (tous matériaux confondus) lors de la montée des premières couches. Les cadences se sont réduites en fin de travaux en raison d'une part de l'étranglement en crête de batardeau et d'autre part des intempéries perturbant la montée des dernières couches.

La Figure 7 donne l'avancement de l'exécution du batardeau en distinguant les différents types de matériaux.

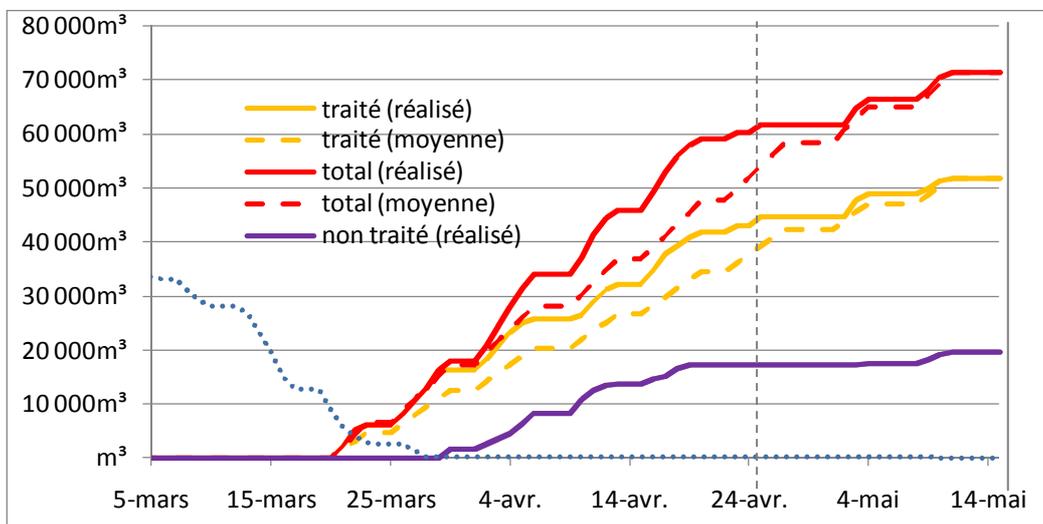


Figure 7. Courbe d'avancement du batardeau ; intempéries importantes à partir du 25 avril

*(les cadences moyennes correspondent à l'objectif prévisionnel de la Maîtrise d'œuvre)*

## 2.6 Retour d'expériences sur le comportement de l'ouvrage

### 2.6.1. Comportement de l'ouvrage à la mise en eau

Conformément à son usage prévu, la réserve d'eau créée en amont du batardeau a été constituée, puis restituée au cours de la période estivale 2012. L'abaissement du niveau a permis d'observer les effets du battillage sur la stabilité des remblais. Il a été constaté qu'une couche de matériaux faiblement compactée (Figure 8 à gauche), qui avait partiellement dévalé la pente lors du régalage ou du compactage des couches supérieures, s'était partiellement érodée, ce qui donne un aspect peu esthétique. Il a également été constaté l'existence d'une zone ponctuelle, à l'interface entre deux couches, présentant une disparition de matériaux sur environ 5 cm d'épaisseur ; cette zone a été traitée par nettoyage et remplissage au mortier.



*Figure 8. A gauche : aspect général du parement aval ; à droite : défaut localisé du parement*

Sur le parement aval, le même phénomène s'était produit (couche de matériaux non compactée car issue du déversement de remblais excédentaires ultérieurs) ; elle a été partiellement érodée par les ruissellements, jusqu'à ce que la végétation s'y installe. La présence de racines constituant une source potentielle d'inquiétude, des vérifications ont été faites, et ont systématiquement conclu à la présence d'un matelas végétalisé, aucune racine n'ayant pénétré dans le matériau traité compacté, comme illustré en Figure 9.

Sur la crête, les épisodes de pluie conjugués à l'absence de mise en place d'un réseau de captation des eaux ont conduit à la présence d'une couche de quelques centimètres d'épaisseur d'arènes qui, bien qu'ayant été traitées, avaient un aspect boueux, au lieu d'être compact comme on aurait pu s'y attendre.



*Figure 9. Aspect général du parement aval ; essai d'arrachement d'une plante.*

### 2.6.2. Comportement de l'ouvrage lors de la surverse

Le projet prévoyait initialement une déconstruction partielle du batardeau en fin de chantier, qui permettait de limiter la hauteur de déversement lors de la phase de remise en eau à quelques mètres au plus. Il n'était

donc pas nécessaire de prévoir de dispositif particulier pour permettre l'écoulement des eaux en aval. D'autres éléments ont également conduit à la décision de ne pas mettre de buse dans le batardeau. La déconstruction ayant finalement été déprogrammée, lors de la remise en eau du barrage, un déversement s'est produit de manière subie et a été attentivement observé ; enfin des inspections par plongeurs ont par la suite pu permettre de procéder à un examen partiel de l'état du parement.



Figure 10. Deux photographies du batardeau pendant le déversement du samedi 2 février 2013

L'observation de vidéos du déversement, de même que des calculs numériques menés à posteriori, indiquent que les vitesses d'écoulement sur le parement aval étaient au maximum de l'ordre de 5 à 6 m/s, et que cette vitesse était uniforme en dehors des 1 à 2 mètres supérieurs environ.

Aucune érosion n'a été constatée durant le déversement, et le témoignage des plongeurs ayant pu reconnaître localement le parement aval n'indiquait aucun indice d'érosion ou d'instabilité en aval du batardeau.

Le batardeau, qui a été conçu dans un souci d'adaptation aux difficultés rencontrées, constitue au final un ouvrage qui a fait la preuve de sa bonne fonctionnalité et de sa pérennité sur une durée de l'ordre de l'année.

### 3. SUIVI ENVIRONNEMENTAL DU MILIEU AQUATIQUE EN PHASE TRAVAUX

#### 3.1 Caractéristiques environnementales du bassin versant

A proximité de l'aménagement de Pannecière, l'Yonne concentre un certain nombre d'enjeux environnementaux. En effet, à l'exception du bief situé entre l'amont du réservoir et le bassin de compensation, l'Yonne est une rivière qui présente une qualité des eaux classée de « bonne » à « très bonne » et un état écologique « très bon » (IBGN > 15/20).

L'Yonne abrite en outre deux espèces de poissons inscrits à l'annexe II de la Directive « Habitat-faune-flore », dont l'une est protégée, et les alentours du réservoir de Pannecière sont classés ZNIEFF de type I et II. Dans le cadre de l'instruction du dossier Loi sur l'Eau, un suivi environnemental conséquent a donc été défini afin de contrôler les incidences des travaux et de mettre en œuvre des mesures de mitigation au cas où cela s'avèrerait nécessaire. Ce suivi a couvert aussi bien le réservoir que ses affluents à l'amont et l'Yonne à l'aval (Figure 11).

Le suivi comprenait trois phases :

- 1 – Caractérisation de l'état initial,
- 2 – Suivi pendant la vidange et les travaux,
- 3 – Caractérisation de l'état final.

Il est par ailleurs composé de trois volets principaux :

- 1 – Suivi physico-chimique des eaux,
- 2 – Suivi hydrobiologique de l'habitat,
- 3 – Suivi du colmatage des frayères.

L'analyse des résultats du suivi a permis de mettre en évidence des impacts des travaux de réhabilitation du barrage de Pannecière dont les plus pertinents sont présentés ci-après.



Figure 11. Emplacement des stations de suivi le long de l'Yonne

### 3.2 Baisse de la teneur en oxygène dissous

Une baisse de la teneur en oxygène dissous très significative a été occasionnée par la vidange de la retenue, comme indiqué au Tableau II. En effet, la vidange implique de relâcher d'importantes quantités d'eau issue de la phase anaérobie du réservoir par la vidange de fond. Ainsi, alors que l'eau entrant dans le réservoir présentait des teneurs de l'ordre de 9 mg/l, l'eau relâchée à l'aval du barrage ne présentait plus que des teneurs de 2 mg/l au début de la vidange, la situation s'améliorant au fur et à mesure que le niveau de la retenue baissait.

Les taux en oxygène dissous sont cependant restés en dessous des seuils d'alerte de niveau 1 et 2 définis par arrêté préfectoral (< 5 mg/l) pendant 3 mois, affectant la faune du milieu aquatique à l'aval du barrage.

Cet effet est en revanche limité dans l'espace puisque même au moment où le taux en oxygène de l'eau relâchée était au plus bas, ce taux remontait à un niveau satisfaisant à l'aval du bassin de compensation (Station 5).

|                                       |          | Station 4 - L'Yonne aval (pont de Pannecière) |          |          |          |          |          |          | Qualité DCE |
|---------------------------------------|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| Paramètres par élément de qualité     | Unité    | 30/06/11                                      | 12/07/11 | 26/07/11 | 17/08/11 | 30/08/11 | 14/09/11 | 27/09/11 |             |
| <b>Météo</b>                          |          | Soleil  | Soleil   | Couvert  | Soleil   | Soleil   | Soleil   | Soleil   |             |
| <b>Salinité</b>                       |          |   |          |          |          |          |          |          |             |
| Conductivité (1)                      | µs/cm    | 43,40   | 39,90    | 44,70    | 53,80    | 55,00    | 55,60    | 50,60    | /           |
| <b>Acidification</b>                  |          |   |          |          |          |          |          |          |             |
| pH                                    | unité pH | 6,92  | 7,66     | 6,89     | 6,64     | 6,82     | 6,88     | 6,88     | TRES BON    |
| <b>Température</b>                    |          |   |          |          |          |          |          |          |             |
| Température Eau (contexte salinicole) | °C       | 8,30  | 9,70     | 9,40     | 15,90    | 18,40    | 19,20    | 17,60    | TRES BON    |
| Température Air                       | °C       | 16,70   | 19,30    | 20,00    | 17,00    | 17,02    |          |          |             |
| <b>Bilan de l'oxygène</b>             |          |   |          |          |          |          |          |          |             |
| O2 dissous                            | mg/l     | 9,56  | 9,86     | 8,60     | 2,11     | 3,06     | 4,10     | 5,34     | MAUVAIS     |
| O2 saturation                         | %        | 81,00   | 86,70    | 76,00    | 21,20    | 32,10    | 44,30    | 56,20    |             |
| <b>Nutriments</b>                     |          |   |          |          |          |          |          |          |             |
| Phosphates                            | mg/l PO4 | <0,05   | <0,05    | <0,05    | <0,05    | <0,05    | 0,06     | <0,05    | BON         |
| Phosphore total                       | mg/l P   | <0,05   | 0,07     | <0,05    | 0,05     | 0,05     | 0,08     | 0,07     |             |
| Ammonium                              | mg/l NH4 | 0,07  | 0,10     | 0,09     | 0,13     | 0,32     | 0,17     | 0,16     |             |
| Nitrites                              | mg/l NO2 | <0,05   | 0,06     | <0,05    | <0,05    | 0,08     | 0,05     | 0,07     |             |
| Nitrates                              | mg/l NO3 | 7,30  | 5,30     | 5,00     | 3,40     | 3,10     | 2,20     | 2,60     |             |

Tableau II. Paramètres physico-chimiques de l'eau à la Station 4 - Pont de Pannecière

Une autre baisse du taux d'oxygène dissous, plus anecdotique, a été enregistrée au moment du passage du fond de la retenue, durant lequel la remise en suspension de matière organique réductrice a entraîné une oxydation et provoqué un déficit en oxygène dissous, comme indiqué en Figure 12.

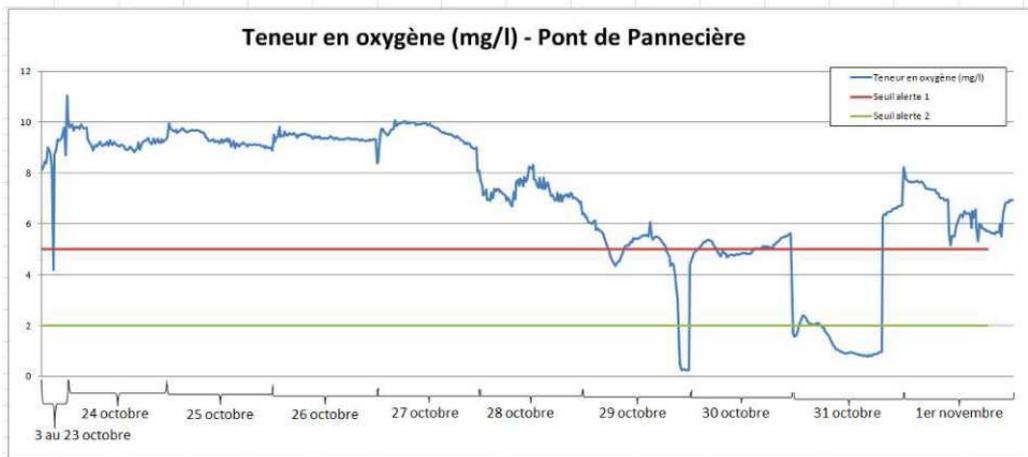


Figure 12. Variation de la teneur en oxygène dissous au moment du passage du culot - Station 4

### 3.3 Augmentation du taux de matières en suspension (MES)

Une forte augmentation des MES a été enregistrée avant le démarrage des travaux en amont. La première augmentation, très ponctuelle a été mesurée à la fin de la vidange pendant le passage du fond de retenue, appelé « culot » comportant une proportion élevée de sédiments, durant lequel des taux en MES atteignaient jusqu'à 20 000 mg/l, et dépassant largement les seuils de niveaux 1 et 2 (Figure 13). Cet événement, de très courte durée, n'a cependant pas eu d'incidence significative sur la qualité des eaux en aval.

Le taux de MES s'est par ailleurs maintenu à un niveau élevé, qualifié de « très mauvais » entre la fin de la vidange et la fin de la construction du batardeau (Tableau III). Cette forte teneur en MES est probablement attribuable au ruissellement des précipitations sur les matériaux meubles du fond de la retenue mis à nu après la vidange.

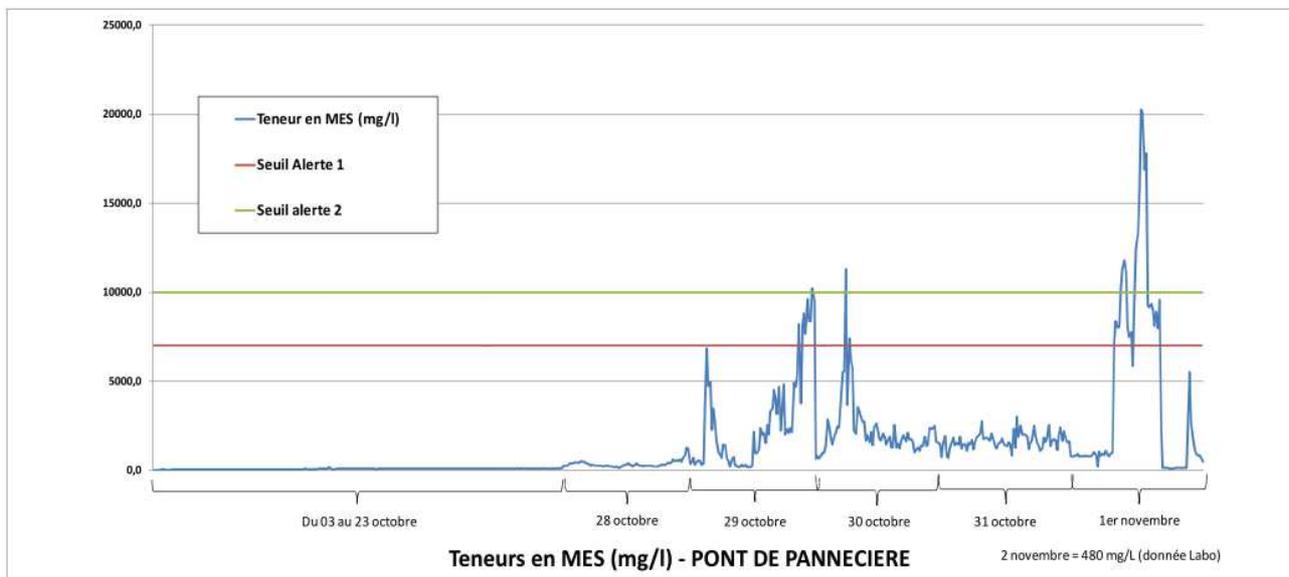


Figure 13. Taux de MES durant la fin de la vidange du réservoir - Station 4 - Pont de Pannecière

|                                  |                                       |          | Station 4 - L'Yonne aval (pont de Pannecière) |                |               |              | Qualité SEQ-Eau v2 - Aptitude à la biologie |
|----------------------------------|---------------------------------------|----------|---|----------------|---------------|--------------|---|
| ALTERATIONS                      | PARAMETRES                            | Unité    | 15/11/11                                      | 08/12/11       | 17/01/12      | 14/02/2012   |   |
| <i>Météo</i>                     |                                       |          | <i>Soleil</i>                                 | <i>Couvert</i> | <i>Soleil</i> | <i>Neige</i> |   |
| Particules en suspension         | MES                                   | mg/l     | 150,00  | 75,00          | 6,00          | 124,00       | Très mauvaise                               |
| Minéralisation                   | Conductivité (1)                      | µs/cm    | 22,10   | 43,80          | 46,00         | 30,20        |   |
| Acidification                    | pH                                    | unité pH | 7,11  | 7,54           | 7,41          | 7,20         | Très bonne                                  |
| Température                      | Température Eau (contexte salinicole) | °C       | 5,50  | 7,80           | 5,18          | 0,90         | Très bonne                                  |
|                                  | Température Air                       | °C       | 5,40  | 8,00           | -0,50         | -2,00        |   |
| Matières Organiques et Oxydables | O2 dissous                            | mg/l     | 12,30   | 12,84          | 12,21         | 15,04        | Bonne                                       |
|                                  | O2 saturation                         | %        | 97,60   | 108,10         | 97,30         | 105,80       |   |
|                                  | Azote Kjeldahl                        | mg/l N   | 1,10  | 0,74           | 0,41          | <0,2         |   |
|                                  | Ammonium                              | mg/l NH4 | 0,30  | 0,20           | 0,07          | 0,21         |   |
| Matières azotées                 | Ammonium                              | mg/l NH4 | 0,30  | 0,20           | 0,07          | 0,21         | Bonne                                       |
|                                  | Nitrites                              | mg/l NO2 | <0,05   | <0,05          | <0,05         | <0,05        |   |
|                                  | Azote Kjeldahl                        | mg/l N   | 1,10  | 0,74           | 0,41          | <0,2         |   |
| Nitrates                         | Nitrates                              | mg/l NO3 | <5  | 6,00           | 6,80          | 7,30         | Bonne                                       |
| Matières phosphorées             | Phosphates                            | mg/l PO4 | <0,05   | <0,10          | <0,10         | 0,07         | Passable                                    |
|                                  | Phosphore total                       | mg/l P   | 0,22  | 0,12           | <0,05         | 0,21         |   |
| Proliférations végétales         | Chlorophylle a                        | µg/l     | 8,10  | Absence        | Absence       | Absente      | Très bonne                                  |
|                                  | O2 saturation                         | %        | 97,60   | 108,10         | 97,30         | 105,80       |   |
|                                  | pH                                    | unité pH | 7,11  | 7,54           | 7,41          | 7,20         |   |
| Eléments métalliques             | Fer total (1)                         | µg/l Fe  | 3524,00                                       | 1157,00        | 233,00        | 4889,00      |   |
|                                  | Manganèse total (1)                   | µg/l Mn  | 257,00  | 88,00          | <20           | 139,00       |   |

Tableau III. Taux de MES durant la phase de travaux du batardeau – Station 4 – Pont de Pannecière

### 3.4 Diminution de l'abondance de macro-invertébrés à l'aval du barrage

Il n'a pas été constaté de dégradation de l'indice IBGN à l'aval du barrage de Pannecière. Ces résultats vont dans le sens d'un maintien de la qualité hydrobiologique de l'habitat.

Cependant, si la qualité hydrobiologique semble être peu affectée par les travaux car l'indice IBGN (qui se calcule en fonction de la diversité spécifique) a faiblement varié, il convient de mentionner que les macroinvertébrés ont été rencontrés dans des quantités très inférieures à la normale pendant les travaux (divisée par 25 env.) et après les travaux (divisée par 2 env.). Ainsi, la constance de l'indice cache un impact certain sur la qualité hydrobiologique de l'habitat à l'aval du barrage.

A la station 4, l'indice IBGN ne s'est pas dégradé, mais c'est probablement parce qu'il est d'ordinaire dans un état médiocre (Tableau IV).

| Station 4                  |                                       |                                       |                    |                    |                    |
|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| L'Yonne en aval du barrage |                                       |                                       |                    |                    |                    |
|                            | 15/05/06                              | 17/07/07                              | 08/06/11           | 14/11/11           | 17/07/2012         |
| Diversité                  | 12                                    | 14                                    | 11                 | 11                 | 10                 |
| Groupe indicateur (GI)     | 3                                     | 3                                     | 2                  | 6                  | 2                  |
| Taxon indicateur           | Limnephilidae                         |                                       | Mollusques         | Nemouridae         | Gammaridae         |
| IBGN                       | 6/20                                  | 7/20                                  | 5/20               | 09/20              | 5/20               |
| Abondance                  | 2 481                                 | 3 795                                 | 1 155              | 52                 | 826                |
| % taxons dominants         | Asellidae (55%)<br>Chironomidae (26%) | Chironomidae (37%)<br>Asellidae (32%) | Chironomidae (91%) | Chironomidae (40%) | Chironomidae (73%) |
| % taxons polluo-résistants | 89,4%                                 | 70,4%                                 | 97,3%              | 63,46%             | 96,38%             |
| % fragiles                 | 50,0%                                 | 28,6%                                 | 9,1%               | 54,55%             | 44,44%             |
| IBGN min                   | 5/20                                  | 7/20                                  | 4/20               | 06/20              | 4/20               |

Tableau IV. Taux de MES durant la phase de travaux du batardeau – Station 4 – Pont de Pannecière

### 3.5 Absence de colmatage des frayères

Un suivi du colmatage des frayères a été effectué sur un intervalle de temps déterminé, tout d'abord juste avant la vidange puis après la construction du batardeau.

Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les deux relevés (Figure 14). Il semble donc que malgré la quantité importante de vase qui a été déplacée durant les travaux, celle-ci ne s'est pas déposée au niveau des frayères, ce qui constitue un point positif au regard des quantités de vase bien plus importantes à extraire que prévu initialement,

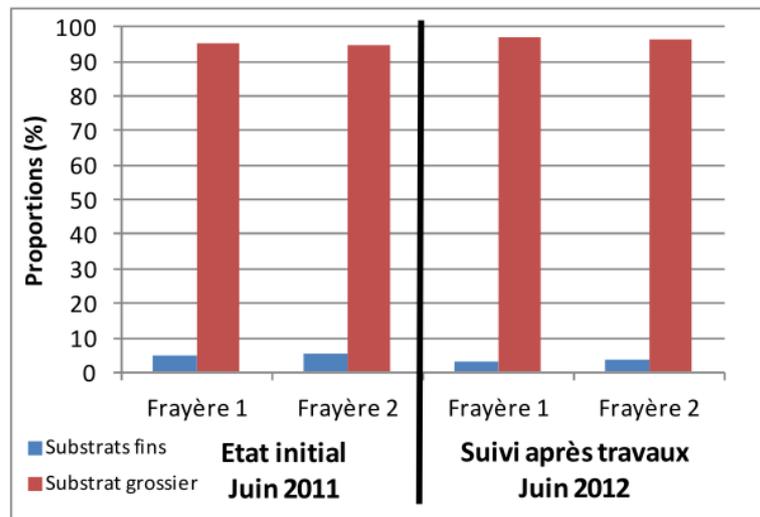


Figure 14. Résultats du colmatage des frayères

### 3.6 Synthèse des impacts environnementaux

Le suivi environnemental mis en œuvre a permis de mettre en évidence que les impacts des travaux de réhabilitation de Pannecière sont plus liés à la vidange du fond de la retenue qu'aux travaux en tant que tels. Les impacts liés au passage en aval des eaux sédimentaires du fond de la retenue, même s'ils ont dépassé très temporairement les seuils fixés par arrêté préfectoral, ne sont cependant probablement pas les plus impactant pour le milieu récepteur en raison de leur survenance très limitée dans le temps.

Les impacts liés à l'exposition des matériaux meubles après vidange de la retenue ont quant à eux été plus préjudiciables pour la faune aquatique notamment. Il convient cependant de relativiser les conséquences en raison de l'amélioration rapide de la qualité de l'eau à l'aval du barrage ; l'amélioration constatée est particulièrement significative dans le cas du barrage de Pannecière grâce à l'existence d'un bassin de compensation.

A noter qu'une pêche de sauvegarde a été réalisée juste avant le passage du fond de retenue, opération menée avec succès. Elle a permis de protéger les espèces juvéniles de poissons issus de la retenue de Pannecière en les redirigeant temporairement vers des étangs voisins de la région.

## 4. ALIMENTATION EN EAU DU SYNDICAT DES EAUX

### 4.1 Enjeu et conception

Le syndicat des eaux SIAEPA, en charge de l'alimentation en eau potable d'une dizaine de communes des environs du barrage, se fournit habituellement en eau brute grâce à un piquage réalisé en aval de la vanne de garde de l'usine EDF, située sur la conduite de la prise d'eau. Naturellement, suite à la mise à sec de la retenue, cette alimentation n'a pas pu être maintenue.

L'interconnexion avec les réseaux voisins ayant été impossible, pour des raisons soit techniques, soit sanitaires, il a fallu mettre en place un nouveau dispositif, permettant d'alimenter le SIAEPA depuis l'Yonne.

Le choix a été de mettre en place une prise d'eau à l'aval du barrage, dans le bassin de dissipation à l'aval des bondes de fond (cours de l'Yonne).

Les avantages de cette implantation étaient doubles :

- Possibilité de maintenir l'utilisation d'une part importante d'installations existantes,
- Proximité de la prise d'eau avec l'usine de traitement du SIAEPA.

En revanche, cette implantation présente comme inconvénient de se trouver immédiatement exposée et impactée en cas de pollution accidentelle à l'amont du barrage, et particulièrement en fin de vidange, à l'afflux de sédiments pouvant rendre les eaux trop chargées pour être traitées.

Afin de pallier ces inconvénients, il a été décidé de mettre en place une réserve tampon, d'une capacité suffisante pour alimenter le SIAEPA pendant environ une semaine (volume stockée de 2 000 m<sup>3</sup>). Cette réserve a été, assez naturellement, positionnée dans le coursier de l'usine EDF, nécessairement hors d'usage pendant la période des travaux de réhabilitation.

Cette réserve devait être alimentée en continu, avec une coupure de l'alimentation en cas de problème détecté (par le turbidimètre, ou par la sonde à hydrocarbures placée au niveau de la crépine de prise d'eau).

Afin de pouvoir alimenter cette réserve gravitairement, il a été décidé de remonter de 40 cm le niveau du seuil aval de l'Yonne, permettant le déversement des eaux des bondes de fond à la confluence du coursier de l'usine EDF.

Pour des raisons techniques, cette réserve a dû être réalisée par l'apport d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane, compte tenu de la forte perméabilité des terrains et afin de garantir le volume suffisant.

#### 4.2 Difficultés rencontrées ou engendrées

Des difficultés survenues lors de la réalisation des travaux ont conduit le SIAEPA à proposer de réaliser une alimentation de secours. Cette seconde alimentation a été réalisée depuis un ruisseau s'écoulant dans l'Yonne quelques dizaines de mètres en aval du site (le ru du Coulard). Le dispositif alternatif, qui a été imaginé pour pallier des retards ou dysfonctionnements possibles de la réserve principale, a parfaitement fonctionné ; toutefois, la Direction Départementale des Territoires (ex Police de l'eau) n'ayant autorisé ce prélèvement qu'à titre temporaire, il n'a pas été possible d'envisager de conserver cette alimentation pour la durée complète des travaux.

La principale difficulté rencontrée a été, lors du passage du fond de la retenue dans le coursier des bondes de fond, une importante sédimentation qui a conduit à une accumulation de sédiments dans l'ensemble du coursier aval de l'Yonne, jusqu'au sommet de la rehausse du seuil, comme indiqué en Figure 15.



*Figure 15. Vue de la prise d'eau envasée de la réserve SIAEPA en aval du coursier des bondes de fond (avant et après ouverture du chenal)*

La crépine de la prise d'eau, en principe située environ 20 cm sous la surface de l'eau, s'est donc trouvée enfouie sous des sédiments. Une opération en « urgence » a été menée, pour libérer cette alimentation, consistant d'une part à déplacer les sédiments qui obstruaient la crépine et d'autre part à aménager un conduit d'aspiration au travers du seuil pour empêcher toute sédimentation au plus près de la prise d'eau.

D'autres perturbations sont intervenues, notamment, en raison de la vague de froid de février 2012, une couche de glace de plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur, a recouvert la réserve d'eau, et, en se cassant suite à une baisse de niveau, est venue au contact avec les conduites positionnées dans le fond de la réserve. Cet évènement a conduit à un dysfonctionnement temporaire de la réserve SIAEPA, qui de par son, implantation au contact des seuls accès possibles au chantier en aval, s'est trouvée décomposée en deux lagunes séparées par un passage busé, complexifiant le fonctionnement normal de l'ouvrage.

## 5. CONCLUSIONS

Les mesures conservatoires ou d'accompagnement des travaux de réhabilitation du barrage de Pannecière, ont finalement permis de satisfaire les enjeux environnementaux au sens large, tout en permettant la réalisation des travaux du chantier principal sans être handicapé techniquement par ces mesures.

Celles-ci ont toutefois nécessité la réalisation de travaux de grande ampleur, dont on peut se demander à posteriori s'ils n'auraient pas pu être minimisés, au regard des différents enjeux de l'opération (coûts, délais). La conclusion vise à identifier quels avantages auraient pu être retirés d'un assouplissement des contraintes environnementales, dans l'intérêt du projet.

### **5.1 Obligation de soutien d'étiage et de laminage des crues estivales**

S'agissant du batardeau, il peut être regretté que les obligations de soutien d'étiage et d'alimentation du canal du Nivernais, qui avaient été imposées au projet, n'aient pas pu être allégées. S'il avait été possible de se dispenser d'un soutien d'étiage, pendant un ou deux étés successifs, il aurait été possible :

- de diminuer potentiellement les 2 millions de mètres cubes de besoins de stockage, pour le soutien d'étiage,
- de débiter les travaux en amont quelques mois plus tôt, ce qui aurait permis d'achever le batardeau avant la période hivernale, peu favorable pour les terrassements ; à noter qu'une vidange anticipée de la retenue n'aurait pas occasionné de perturbation sur l'opération de pêche de sauvegarde, qui s'en serait très bien accommodée.

Par analogie, la dispense de laminage des crues estivales aurait permis de prévoir que les vannes des bondes de fond resteraient grandes ouvertes en période d'étiage, ce qui aurait permis de ne pas prendre en compte le volume de laminage des crues estivales, et de diminuer le volume de stockage et donc du batardeau pour la protection du chantier en amont contre les crues.

### **5.2 Continuité de l'alimentation en eau brute**

Concernant la réserve d'eau brute destinée au SIAEPA, la solution la plus simple aurait été une interconnexion avec le réseau d'alimentation voisin, qui avait la capacité de fournir le débit requis. Cette solution n'a pas été acceptée par l'Agence Régionale de Santé, car les caractéristiques de l'eau du syndicat voisin dépassaient légèrement les seuils réglementaires pour un composant chimique, l'arsenic ; la tolérance qui était -de fait- accordée au syndicat des eaux voisin, n'aurait-elle pas pu être, temporairement étendue par dérogation au SIAEPA pour la durée des travaux, moyennant le cas échéant des traitements chimiques complémentaires ?

L'autre solution aurait pu être d'accepter une alimentation directe depuis les prises d'eau, sans besoin de constituer une réserve. Si nécessaire, une alimentation de secours par le ru situé à proximité aurait pu pallier un défaut d'alimentation principale, pour limiter le risque d'une coupure accidentelle de l'alimentation en eau brute.

### **5.3 Mesures de la qualité des eaux**

Enfin, concernant la mesure du taux de matières en suspension dans l'eau, il est à retenir que, si les mesures réalisées étaient particulièrement complètes, elles intervenaient suivant un calendrier relativement déconnecté des conditions météorologiques. Hors, on pouvait assez aisément constater que, lorsque la retenue était vide, l'eau se chargeait lors des épisodes pluvieux, et redevenait très rapidement limpide ensuite. Les données qui ont été mesurées, malgré leur apparente exhaustivité, et l'ampleur des campagnes de prélèvement et d'analyses, ne permettent pas d'avoir une idée réellement satisfaisante des impacts de l'opération de vidange sur le charriage de matières en suspension en aval de l'ouvrage.

### **5.4 Enseignements à retenir pour une future vidange**

Si l'impact des mesures de protection et de sauvegarde a été très important dans le cadre de cette opération, on peut se réjouir que le batardeau qui a été réalisé, est d'une hauteur telle qu'il permet d'envisager, après étude et approbation des services de l'Etat, une mise à sec de l'ouvrage sans procédure de vidange complète de la retenue. Cela permettra vraisemblablement, lors des vidanges ultérieures, de s'affranchir des principales problématiques dont il a été question dans cet article : protection du chantier, pêche de sauvegarde, matières en suspension dans les eaux d'exhaure en aval.

La seule contrainte qui n'est pas supprimée par le batardeau est l'alimentation en eau du SIAEPA ; toutefois, l'interconnexion des réseaux d'alimentation d'eau potable devrait devenir possible avec la mise aux normes des stations de traitement voisines, permettant de s'affranchir d'une nouvelle réserve temporaire d'eau brute.