

Confortement et mise à niveau du barrage de Torcy Neuf

Strengthening and upgrade of Torcy Neuf dams

Olivier S. JULLIEN, Tractebel Engineering
129 rue Servient 69326 LYON
olivier.jullien@gdfsuez.com

Patrick Lignier, Tractebel Engineering
129 rue Servient 69326 Lyon
Patrick.lignier@gdfsuez.com,

Denis Rouvière, Tournaud
5 rue de Fos sur Mer 69 348 Lyon cedex 3 Adresse postale
denis.tournaud@vinci-construction.fr

MOTS CLÉS

Barrage, remblais, maçonnerie, évacuateur de crue, piézométrie, vidange de fond, auscultation, béton armé, préfabriqués

RÉSUMÉ

Voie Navigables de France exploite le barrage de Torcy Neuf, propriété de l'Etat, afin d'alimenter en eau le Canal du Centre. L'ouvrage a été construit à la fin du XIXème siècle en remblais homogène avec un perré maçonné. Il est équipé d'un évacuateur de crue à seuil libre en rive gauche et d'une tour de prise d'eau abritant la vidange de fond et des prises d'eau étagées.

Le vieillissement progressif de l'ouvrage et l'observation de quelques pathologies sur le parement aval ont conduit le Maître d'Ouvrage à réaliser le confortement et la mise au niveau du barrage conformément à la réglementation des ouvrages intéressants la sécurité publique.

Le marché de réalisation de l'opération a été confié par VNF à un groupement momentané d'Entrepreneur dans le cadre d'un marché de Conception Réalisation. Le groupement était composé de GTM Terrassement, Tournaud, Coyne et Bellier, CAEI Environnement, Sarl MCC et l'architecte Paysagiste Piotr Jeziorowski.

L'opération a consisté dans un premier temps à mener à bien les études de projet et de modélisation hydraulique de l'évacuateur de crue, à soumettre les conclusions des études au CTPBOH puis dans un second temps à réaliser les travaux prévus.

L'article présente le détail des études et travaux réalisées ainsi que les adaptations qui ont été nécessaires suite à la réalisation du modèle réduit physique de l'évacuateur et à une nouvelle campagne de reconnaissances géotechniques.

ABSTRACT

Voies Navigables de France operates Torcy Neuf dam, owned by the state, in order to provide water to the 'Canal du Centre'.

The dam is equipped with a free ogee spillway on the left bank and an intake tower which includes the bottom outlet.

The ageing of the dam, built in the late nineteenth century, led the owner to strengthen and upgrade as per French regulation;

The works and studies were given as a turnkey contract to a joint consortium composed by GTM Terrassement, Tournaud, Coyne et Bellier, CAEI Environnement, Sarl MCC et l'architecte Paysagiste Piotr Jeziorowski.

Operation started with detailed design and hydraulic model simulation. They were followed by submission to French Comitee CTPBOH and works.

Present article gives details about the dam, the studies and the works performed to strengthen and upgrade the dam.

1. INTRODUCTION,

Le Maître d’Ouvrage (Voies Navigables de France) a lancé une consultation pour les travaux de confortement en « Conception – Réalisation ». Le marché a été attribué au groupement composé des entreprises et bureaux d’études suivant :

- Tournaud (mandataire – Génie civil),
- GTM Terrassement (Terrassement)
- Coyne-et-Bellier (Ingénierie barrage)
- MCC (Equipements hydromécanique)
- CAEI (Environnement)
- Françoise Gouttebauge (Architecte- paysagiste)
- Piotr Jeziorowski (Architecte – paysagiste).

Il avait pour objet :

- les études de projet (PRO),
- la réalisation d’un modèle réduit hydraulique de l’évacuateur de crue,
- l’assistance au Maître d’Ouvrage pour la présentation au CTPBOH du projet,
- les dossiers d’incidence et d’autorisation des travaux et la vidange de l’ouvrage (si cette vidange était nécessaire),
- la définition du cahier des charges techniques pour la réalisation des travaux (DCE),
- la réalisation des travaux par le groupement avec le suivi du chantier assuré par le groupement et plus particulièrement, le rôle de Directeur des Travaux assuré par Coyne et Bellier,
- les opérations préalables à la réception des travaux.

La réception des travaux (AOR) était une mission assurée par le Maître d’Ouvrage VNF.

Le marché est entré en vigueur le 16 juillet 2007. Les études de projet ont été réalisées avec une campagne de reconnaissances complémentaires entre juillet et décembre 2007. Le passage au CTPBOH a eu lieu entre janvier et juin 2008.

Les travaux sur l’ouvrage ont débuté en juillet 2008 et se sont achevés en décembre 2010. Des réserves relatives principalement à l’installation des cellules de pressions interstitielles ont été émises dans le PV de réception provisoire. Ces réserves sont encore en cours de résolution.

2. OBJET DES TRAVAUX

Les travaux de confortement avaient pour objet l’amélioration de la sécurité de l’ouvrage selon les règles de l’art et les règlements en vigueur. Ils étaient également l’occasion de réaliser la vidange décennale du barrage (ancienne réglementation) afin de permettre l’exécution de la majeure partie des travaux hors d’eau. Le diagnostic du comportement barrage de Torcy Neuf avait été établi lors de plusieurs études antérieures (Coyne et Bellier, LRPC Autun, Hydrogéotechniques, ISL). Les conclusions principales de ces études étaient les suivantes:

- Sous-dimensionnement de l’évacuateur de crues,
- Capacité de vidange inférieure au critère prescrit par le guide BETCGB : diminution de moitié de la charge appliquée sur le barrage en 7 jours,
- Stabilité du remblai aval avec une réserve de sécurité insuffisante par rapport aux règlements en vigueur et notamment les Eurocodes.

D’autre part, le Maître de l’Ouvrage souhaitait moderniser l’entretien et la maintenance de l’ouvrage. Les travaux ont en conséquence comporté la motorisation des vannes et leurs commandes à distance, la modernisation du système d’auscultation et la télétransmission des mesures, la mesure du débit restitué et la possibilité aux avaliers de contrôler les débits annoncés.

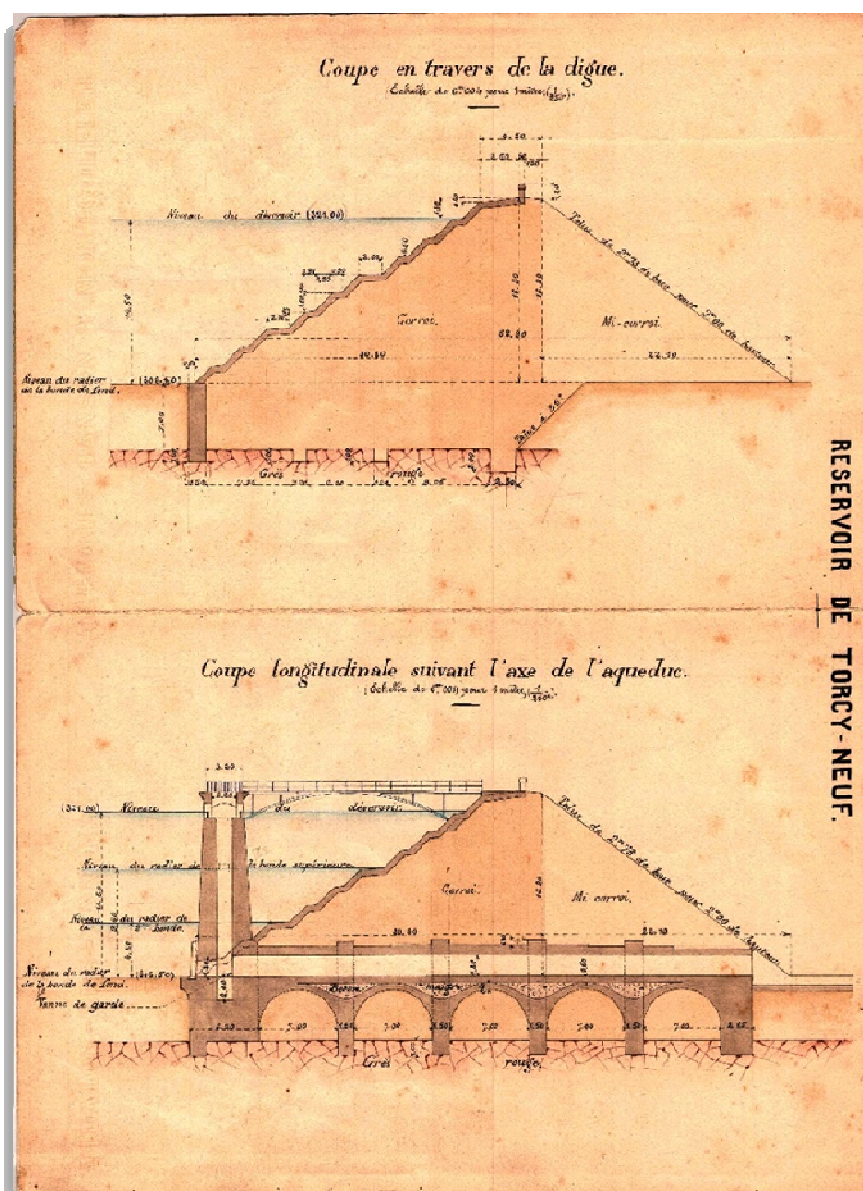
3. DESCRIPTION DU BARRAGE

Le barrage de Torcy Neuf est situé en région Bourgogne, dans le département de la Saône et Loire (71), à proximité de la ville du Creusot, sur la commune de Torcy. Il est placé sur le cours d’eau de la Bourbince et crée une retenue de 8,0 Mm³ à retenue normale : 321,10 NGF.

Le barrage de Torcy Neuf se compose d'un remblai homogène de 16m de hauteur et 400m de longueur avec perré maçonné sur le talus amont et surmonté d'un parapet en maçonnerie en crête. Les ouvrages annexes sont la tour de vidange de fond avec pertuis de restitution et vidange de fond ; l'évacuateur de crues à seuil libre en rive gauche.

- Digue

La digue est constituée d'un remblai homogène d'environ 16,3 m de haut comportant selon les documents d'archives une zone amont dite « corroi » plus imperméable et une zone aval dite « mi-corroi ». Elle est fondée à l'amont sur le substratum rocheux par l'intermédiaire d'une bêche en maçonnerie. La recharge aval repose sur la fondation constituée de dépôts alluvionnaires et des produits d'altération du grès saxonien. Le parement aval connaît une forte pente d'environ 1,4 m horizontal pour 1 m vertical soit 35 degrés, ce qui est raide pour ce type d'ouvrage.



- Parement amont

Le parement amont est revêtu par un perré maçonné, depuis le terrain naturel en pied amont, jusqu'au parapet en crête, disposé en gradins. Sa fonction principale est de protéger le talus amont contre les vagues dans sa zone de marnage. Il est prolongé au pied amont par un mur de garde de profondeur 3 à 7 m et de 1,5 m d'épaisseur.

- Réservoir

La retenue du barrage présente à retenue normale 321,1 NGF une superficie de 165 ha et un volume de 8,0 Mm³. La cote d'exploitation du plan d'eau a varié en fonction des époques et des observations sur le barrage entre les cotes 321,1 NGF au plus et 319,66 NGF au moment des travaux (compte tenu du diagnostic de l'ouvrage et de la nécessité d'entreprendre des travaux de mise en sécurité).

Après confortement du barrage, la cote d'exploitation du plan d'eau sera de nouveau portée à 321,1 NGF, la cote de la retenue normale. La gestion du plan d'eau est fonction de l'alimentation du canal du Centre avec deux saisons marquées, la saison de remplissage de novembre à mai et la saison de vidange de juin à octobre.



Tour de prise et de vidange

La tour de prise fondée sur le substratum rocheux présente une hauteur de 16,30 m et une section carrée de 3,5 m de côté au sommet. Elle est évidée par un puits de 1,5 m de diamètre qui débouche dans une galerie en maçonnerie traversant la digue et de fil d'eau à la cote 306,26 NGF. La galerie trouve son exutoire aval dans un petit chenal de largeur 1 m restituant les eaux à la rivière.

La tour de prise réunit les trois fonctions suivantes :

1. Prise d'eau

Deux prises d'eau de section théorique 0,4 m × 0,8 m permettent d'assurer l'alimentation du canal du Centre et de fournir un débit réservé de 37 l/s.

2. Vidange de fond

La vidange de fond se fait par la galerie et le chenal précités en manœuvrant une vanne segment de dimensions 0,40 (l) × 0,80 (h) avec une hauteur de débattement de 0,22 m. Cette vanne est manœuvrée toutes les semaines afin d'éviter l'envasement.

3. Evacuation des petites crues

Dans la tour de prise, quatre seuils déversant à la cote 320,36 NGF contrôlent la montée du plan d'eau pour les petites crues.

La galerie sous remblai, de section 1 m (l) × 1,8 m (h), est équipée d'une vanne de garde amont de type vanne wagon. Elle est fondée au substratum rocheux par l'intermédiaire de voûtes en maçonnerie et débouche à l'aval dans le lit de la Bourbince.

- Evacuateur de crues

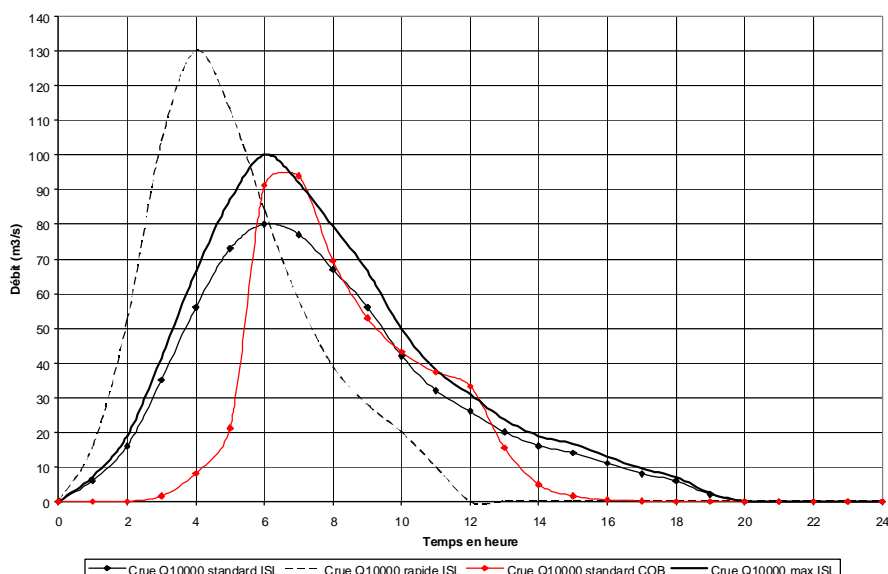
L'évacuateur de crues est situé en rive gauche. C'est un grand seuil latéral débouchant dans un déversoir en forme d'auge poursuivi par un coursier étroit en maçonnerie d'environ 120 m de longueur et guidant les débits de crue jusqu'à l'aval du barrage. Le seuil amont a une longueur développée totale de 81 m dont 69 m à la cote 321,10 NGF et 12 m à la cote 320,8 NGF. Cette petite partie du déversoir de 12 m de longueur était batardable à la cote 321,1 NGF.

- Hydrologie

Les études ayant précédées le confortement et celles menées par Coyne et Bellier ont conduit aux principales conclusions concernant les crues :

Crue	Débit de pointe, m ³ /s	Volume, hm ³
Crue centennale	37	1,12
Crue millennale	58	1,73
Crue cinqmillennale	73	2,16
Crue décennennale	130	2,33
Crue, Pluie Maximale Probable	212	3,8

Pour la crue de projet décennennale, quatre hydrogrammes de crues ont été envisagés. Celui donnant les résultats les plus défavorables pour les calculs de laminage a été retenu. Les quatre hydrogrammes sont présentés dans le tableau ci-dessous.



Le débit pris en compte pour le dimensionnement de l'évacuateur de crues après laminage a été finalement de 80m³/s.

- Géologie et géotechnique

Schématiquement, la géologie présente quatre typologies de matériaux qui se succèdent en couches horizontales à partir du substratum rocheux constitué de grès rouge saxonien.

Au toit du grès saxonien, des produits d'altération du substratum sous la forme d'arènes sablo-argileuses plus ou moins indurées évoluant vers la surface en sables argileux. Ces horizons présentent globalement des caractéristiques satisfaisantes (horizons 3 et 4).

Sur une largeur d'environ 100 m au droit de l'ancien lit de la Bourbince, ces horizons 3 et 4 sont surmontés par des dépôts alluvionnaires (horizon 2). Cet horizon est constitué de couches sableuses et argileuses.

La couche sableuse d'environ 2 m de puissance, plus perméable est le siège des écoulements d'eau comme le dénote la présence d'eau dans les puits à la pelle et les sondages réalisés.

Enfin, une couche de couverture argileuse de puissance métrique. La recharge aval construite en rive droite est constituée de ce matériau. Sur les rives, cet horizon est posé directement sur les horizons d'altération 3 et 4.

Pour les calculs de stabilité de la digue, les paramètres géotechniques ont été considérés à partir des résultats des reconnaissances disponibles et par déduction en supposant le remblai en équilibre limite. C'est-à-dire que es paramètres géotechniques ont été calibrés afin d'obtenir un coefficient de sécurité de 1 pour le profil aval de la digue en l'état actuel.

Description	Horizon	Caractéristique minimale
Couche argileuse de couverture	Horizon 1	$c'=0$, $\varphi'= 20^\circ$
Alluvions	Horizon 2	$c'=22$ kpa , $\varphi'= 14^\circ$ ou $c'=0$, $\varphi'= 24^\circ$
Produits d'altération du substratum	Horizons 3 et 4	$c'=5$ kpa , $\varphi'= 30^\circ$
Corps de la digue	Horizon 5	$c'=5$ kpa , $\varphi'= 35^\circ$

- Séisme

L'étude réalisée par le BRGM à la demande du Maître d'Ouvrage a conclu aux résultats suivants qui ont été pris en compte dans les études de confortement de l'ouvrage :

	Intensité (MSK)	Magnitude	PGA (Peak Gravity Acceleration)
Séisme Maximum Historiquement Vraisemblable(SMHV)	VI	4,3	0,13
Séisme Majoré de Sécurité (SMS)	VII	4,8	0,17

- Dispositif d'auscultation

Le dispositif d'auscultation était composé des éléments suivants :

- 5 profils amont-aval équipés de 5 piézomètres ouverts qui mesuraient le niveau piézométrique dans le corps du barrage (à l'axe et en aval), en fondation (à l'axe) et au pied de l'ouvrage ;
- 1 piézomètre supplémentaire entre les profils 2 et 3 ;
- 1 mesure de débit du drain collecté au pied rive droite dans la recharge aval.

4. CRITERES DE PROJET

- Généralités

D'un point de vue général les critères de projet ont été établis sur la base des règlements, standards et normes en vigueur, au moment des études en 2007, [1] , [2], [3], [4], [5].

- "Petits Barrages, recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi", éditions du Cemagref,
- "Guide pour le contrôle des barrages en exploitation", BETCGB
- "Design of Small Dams", USBR,
- Bulletins de la CIGB.
- Eurocodes.

Néanmoins pour certains aspects des critères de projet ont été fixés par le Maître d'Ouvrage et exploitant.

- Remblai et fondation

Stabilité générale

Pour la sécurité vis-à-vis d'éventuelles instabilités des talus du remblai ou de la fondation du barrage, les calculs ont été menés avec des valeurs réduites avec les coefficients partiels suivants :

	Coefficient partiel sur la cohésion	Coefficient partiel sur la tangente de l'angle de frottement
Combinaisons fréquentes : Stabilité talus aval sous cote de retenue normale ; Stabilité talus amont en vidange contrôlée (vitesse d'abaissement 10 cm/jour)	1,5	1,5
Combinaisons rare Stabilité talus aval sous Plus Hautes Eaux	1,3	1,3
Combinaison accidentelle : Stabilité talus aval sous Séisme sous cote de retenue normale	1	1

Ces valeurs ont été prises en compte conformément aux critères de projet définis par le Maître de l'Ouvrage et conformes aux recommandations du CFBR.

Risque d'érosion interne et liquéfaction

Le projet devait également permettre de contrôler les risques d'érosion interne, à savoir :

- érosion interne le long de la galerie maçonnée,
- boulangerie au débouché des écoulements suintant sur le talus aval,
- instabilité des sols de fondation (et notamment entraînement des sables fins),
- érosion interne générée par les défauts locaux sur le parement aval (souches, piézomètres).

Vis-à-vis de la liquéfaction de la fondation, le projet devait s'assurer que :

- le risque de liquéfaction localisé présentait un coefficient de sécurité au moins égal à 1 (le risque localisé était défini par un risque non susceptible de menacer le barrage, en raison de la faible extension de la zone concernée),
- le coefficient de sécurité vis-à-vis d'un risque de liquéfaction non localisé (ne satisfaisant pas au critère précédent) devait être au moins égal à 1,33.

Ces risques ont été évalués pour le séisme de projet SMHV (séisme maximum historiquement vraisemblable), majoré de +0,5 en magnitude et +I en intensité.

- Evacuateur de crues

Les critères minimaux de dimensionnement étaient les suivants :

- pour le calcul des Plus Hautes Eaux, la crue de projet est décennale (période de retour $T = 10\,000$ ans) ;
- la revanche minimale au-dessus des Plus Hautes Eaux est la suivante :
 - o 1,30 m (sans parapet),
 - o 1,00 m hors parapet et 1,20 m de parapet,
- dans tous les cas, la revanche doit être suffisante vis-à-vis des vagues de projet,
- la stabilité de la partie du coursier aval doit être assurée pour une crue centennale et sans danger pour la sécurité du barrage pour les crues plus rares.

- Vidange de fond

La capacité d'évacuation de la vidange de fond devait permettre :

1. la diminution de 50% de la poussée sur le barrage en moins de 8 jours sans apports naturels,
2. la vidange totale de la retenue en 21 jours dans les mêmes conditions,

La cote initiale de la retenue, pour les calculs de vidange, était la cote de retenue normale (321,1 m NGF), La stabilité des structures de la tour et de la galerie de restitution doivent être garanties pendant toute la durée de l'opération de vidange rapide, en particulier vis-à-vis des phénomènes suivants : pressions dynamiques et risques de cavitation, érosion et abrasion par les écoulements en vitesse,

5. ETUDES DE PROJET ET TRAVAUX REALISES

- Remblai

Compte tenu de la géométrie de la digue (parement amont raide 1,4h/1v), de la nature homogène des matériaux et de l'absence de filtres et drain, les diagnostics de l'ouvrage ont montré que le talus aval présentait un coefficient de sécurité global proche de 1 et que l'ouvrage ne présentait pas de garanties suffisantes vis-à-vis de l'entraînement des matériaux (renard).

Mesures confortatives du talus aval

Les études menées au cours du concours pour l'attribution du marché (AVP) et celles menées ensuite en phase projet (PRO) ont permis de définir les mesures confortatives du talus aval selon les deux éléments essentiels suivants :

- Mise en place d'un dispositif de drainage dans la digue existante au moyen de :
 - o 14 tranchées de sable de 2 m de largeur dans le remblai, perpendiculaires à l'axe du barrage, distantes de 7,5 m entre les profils 2 et 4 et de 10 m au-delà, profondeur 5 m (entre les cotes 307 et 312 m NGF) dans leur partie amont.
 - o 17 puits de décompression de diamètre Ø600 allant dans la fondation casser les sous pression sous l'horizon 3.
 - o 1 Cordon drainant longitudinal (2 × 1 m) sur chaque rive avec collecte des débits drainés et mesures automatisées des valeurs.
- Construction d'une recharge aval constituée de trois séries de risbermes aux cotes 310, 314 et 318 m NGF.

Ces deux dispositions ont permis dans un premier temps d'abaisser la ligne de piézométrie dans le corps de l'ouvrage et dans sa fondation et d'assurer la stabilité du remblais avec des coefficients de sécurité conformes aux règles de l'art .

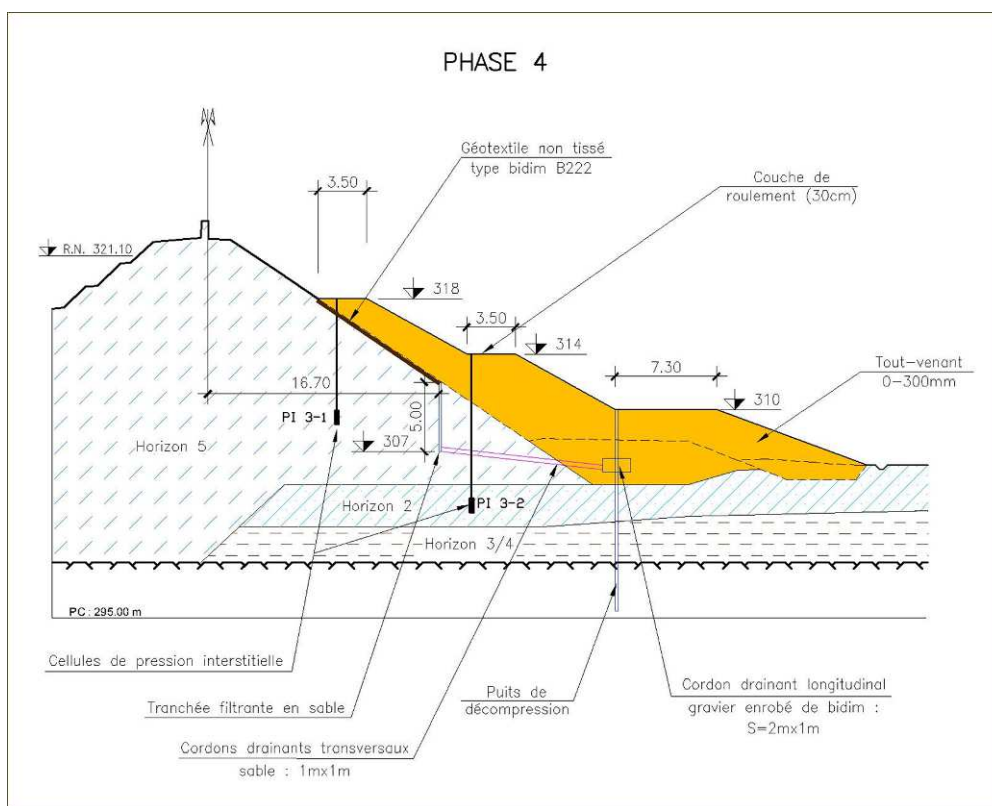


Figure 1: Profil de la digue et de la recharge aval

Lignes piézométriques à l'état initial

Afin de définir les tailles et position des dispositifs de drainage et de la recharge aval, Coyne et Bellier a effectué une modélisation aux éléments finis des écoulements à travers le remblai et sa fondation à l'aide du logiciel MODFLOW (WebTech360). Il s'agit d'une modélisation 3D sur une tranche de 10 m située au niveau du profil 3 (proche de la vidange de fond).

Pour ces calculs, les perméabilités dans le corps de la digue ont été calibrées par rapport aux niveaux piézométriques mesurés avant les travaux de confortement. Deux lignes piézométriques avant les travaux de confortement ont été définies :

- Piézométrie Normale : obtenue avec une perméabilité relativement homogène dans la digue, cette ligne piézométrique se rapproche des mesures actuelles.
- Piézométrie Haute : obtenue avec une perméabilité très faible dans la partie aval de la digue, elle correspond à une piézométrie au-dessus des valeurs mesurées en particulier dans la partie amont (ligne d'eau surélevée d'environ 4m).

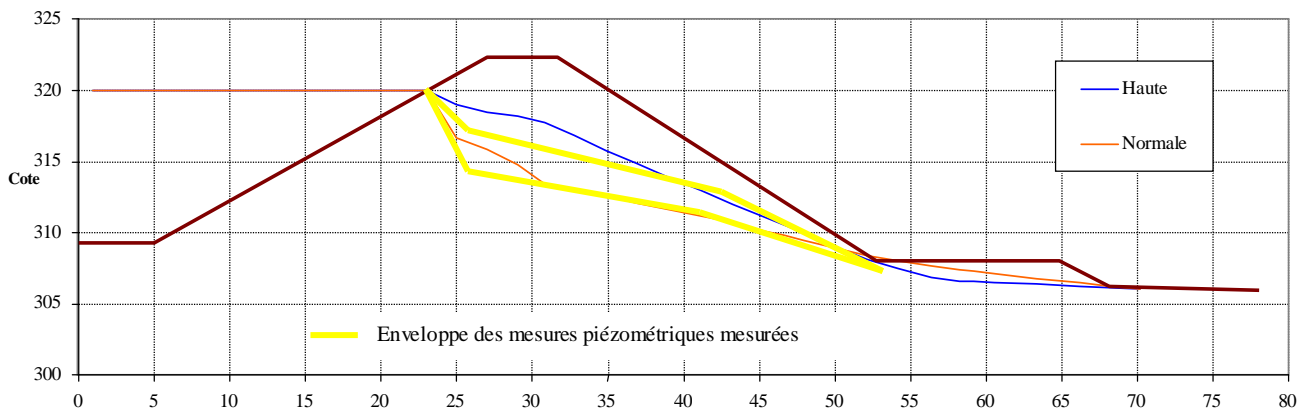


Figure 2: Lignes piézométriques à l'état initial

Les lignes piézométriques calculées en tenant compte des dispositifs de drainage conçus par l'équipe de projet sont représentées sur la figure suivante (Elles sont conformes aux observations après travaux) :

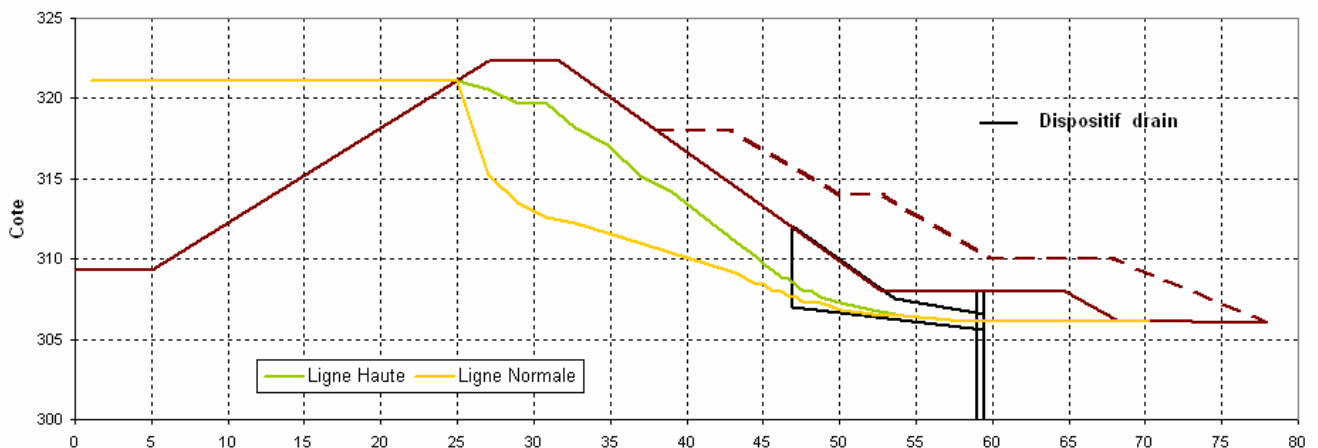


Figure 3 : Lignes piézométriques entre deux tranchées transversales

On peut constater que les lignes piézométriques à travers le remblai sont rabattues par le dispositif de drainage :

- les lignes d'eau sont rabattues au pied de la tranchée drainante (Cote 307 NGF – rabattement d'environ 3 m),
- elles présentent des niveaux piézométriques très différenciés à l'amont. A titre d'exemple, à l'aplomb de la crête du barrage, les niveaux suivants sont calculés :
 - o Piézométrie normale : 313 m NGF,
 - o Piézométrie haute : 319 m NGF
- Entre deux tranchées, la ligne d'eau est similaire à celle située au niveau des tranchées avec une surélévation locale de 1 m environ au droit du cordon longitudinal.

Autrement dit, les tranchées drainantes aval servent de « puits de piézométrie », les lignes d'isovaleurs plongent vers elles et permettent de réduire sensiblement la piézométrie dans le corps de la digue.

Les calculs ont également montré que les conditions aux limites au niveau des zones drainantes permettaient de rabattre la piézométrie quelles que soient l'hétérogénéité verticale/horizontale de la perméabilité.

Les tranchées ont été creusées à la pelle mécanique à bras long et ont été remplies de sable. La granulométrie du sable avait été sélectionnée de manière à stopper les migrations éventuelles des particules fines de la digue vers l'aval.

Les puits drainants ont été réalisés à la foreuse de diamètre 600mm remplis de sable et d'un tube crépiné à leur centre. Chaque puits a été réalisé en aplomb du cordon drainant et équipé d'une tête permettant de mesurer individuellement les débits récoltés.

Dimensionnement du dispositif de drainage

Le dispositif de drainage a été dimensionné de telle façon que la totalité des débits qui transitent à travers l'ouvrage puisse être évacuée à travers le système de drainage. Il a également été conçu de manière à être protégé de toute pollution par des entrainements de matériaux.

Sur chaque rive, il s'agit d'un cordon drainant de 1m de hauteur par 2m de largeur en gravier entourés de sable et de géotextile servant de filtres successifs aux éventuelles migrations de particules fines depuis la digue.

Les cordons drainants débouchent dans des chambres de mesures situées de part et d'autre de la vidange de fond. Chaque chambre est équipée d'un bac avec un seuil calibré permettant la mesure et la télémessure des débits recueillis.

Les cotes des cordons drainants, des têtes des puits filtrants et des seuils de mesures des débits sont 3 à 5 mètres sous le niveau de la recharge aval. Les accès à ces équipements sont en conséquence assurés par des puits verticaux d'un mètre de diamètre.

Stabilité du talus aval

Les dimensions de la recharge aval ont été déterminées d'après les lignes piézométriques calculées précédemment et par des calculs 2D de stabilité de talus avec le logiciel STAB.

Les calculs ont été effectués selon la méthode de Bishop d'équilibre limite type « cercles de glissement ».

Les calculs au séisme ont été menés en utilisant la méthode de Fellenius.

Cinq profils ont été modélisés. Ils correspondent aux profils pourvus d'équipements d'auscultation de l'ouvrage (piézomètres).

Les résultats obtenus avec la recharge aval et le dispositif de drainage montrent des coefficients de sécurité supérieurs à 1,3 en service normal et 1,0 en situation accidentelle.

Des études de sensibilité sur les paramètres mécaniques des horizons 2 et 3 de la fondation et sur la ligne piézométrique dans le corps de la digue ont été réalisées et ont montré que la stabilité du remblai restait assurée avec des coefficients de sécurité conformes aux règles de l'art.

Le volume total de la recharge aval représente environ 12000 m³ de matériaux d'apport.

Le système de drainage et la recharge aval ont également permis de conforter l'ouvrage contre le mécanisme d'érosion interne : les valeurs des débits de drainage calculés sont faibles et tous les dispositifs en place sont équipés de sable filtrant et de géotextile.

De plus, le contact entre la digue existante et la recharge aval a été traité par excavation superficielle et mise en place d'un géotextile filtrant sur tout le contact.

- Stabilité du talus amont

La stabilité du talus amont a également été contrôlée par calculs à la vidange rapide et vérification de la stabilité du talus avec le logiciel STAB.

Les résultats obtenus ont conduit à limiter l'ouverture de la vidange de fond à 20% en situation normale (notamment lors des vidanges décennales) et d'autoriser son ouverture en situation exceptionnelle uniquement. Un dispositif de commande de la vidange permet d'assurer cette distinction à l'exploitant qui doit déverrouiller la commande pour dépasser 20% d'ouverture.

Le perré maçonné du parement amont a de plus fait l'objet d'une rénovation complète par nettoyage et purge des joints de mortiers et rejointoiement avec un mortier à hautes résistances mécaniques ainsi que mise en place de barbacanes de drainage régulièrement espacées.

La crête du barrage a été rehaussée d'un muret en L en béton armé habillé de maçonneries pour maintenir l'aspect visuel du barrage dans son ensemble. La crête elle-même a fait l'objet d'un remblayage avec des matériaux d'apport 0-300 et mise en place d'un revêtement sur 15 cm de béton balayé.

- Evacuateur de crues

Laminage des crues et cotes des PHE

Avant réhabilitation, le fonctionnement hydraulique de l'évacuateur était clairement défectueux avec d'une part, un ennoisement du seuil pour des débits supérieurs à 20 m³/s et d'autre part, une variation trop brutale de la section du coursier ne permettant pas, sans débordements intempestifs, l'évacuation de débits supérieurs à 10 m³/s, à comparer avec les débits laminés de la crue de projet d'environ 80 m³/s.

Plusieurs hydrogrammes de crues décennales ont été prises en compte, les résultats les plus défavorables en termes de hauteur d'eau dans la retenue après laminage de la crue ont été retenus pour le dimensionnement du projet.

Etant donné les contraintes d'exploitation du plan d'eau et le souhait du Maître d'Ouvrage de ne pas vanner l'évacuateur pour des commodités d'exploitation, il a été nécessaire, pour assurer le passage de la crue décennale, de rehausser la crête du barrage de 80 cm afin d'assurer une revanche nécessaire de 1,30 m.

La revanche a été choisie conformément aux critères de projet définis par le Maître de l'Ouvrage. Les calculs effectués avec la formule de BRETSCHNEIDER recommandée par Comité Français des Grands Barrages arrivaient à une valeur de 1,20m.

Finalement les caractéristiques de l'évacuateur rénové sont les suivantes :

- Seuil libre de 50m de longueur calé à la cote de retenue normale, RN : 321,10 m NGF,
- PHE : 321,90 NGF
- Cote crête : 323,20 NGF (Il est à noter que pour la Crue Maximale Probable, le plan d'eau ne dépasse pas la cote de la crête).
- Revanche : 1,3 m.
- Débit maximum de l'évacuateur (après laminage) lors de la crue décennale Q : 80 m³/s

Fonctionnement hydraulique

L'évacuateur de crue est constitué de trois éléments distincts.

- le seuil déversant qui contrôle le débit,
- le déversoir en forme d'auge qui permet la mise en vitesse de l'écoulement
- le coursier qui assure l'évacuation à l'aval, à l'écart du pied du barrage.

Lors des études d'avant projet effectuées pour le concours d'attribution du marché, il avait été identifié et prévu de revoir hydrauliquement ces trois structures, avec un nouveau seuil déversant, une auge revue sensiblement et un coursier aval reconstruit entièrement pour permettre le passage des débits de crue.

Les résultats principaux du modèle réduit ont conduit à revoir en profondeur les formes définies en phase d'avant projet. Il a en effet fallu :

- approfondir de 2 m environ la partie du déversoir en forme d'auge et d'augmenter la pente du coursier de 2% afin d'assurer l'évacuation des débits arrivant du seuil déversant,
- augmenter les hauteurs des bajoyers afin de prévenir les débordements éventuels liés à la propagation d'onde stationnaires dans le coursier.

Les travaux réalisés sur l'évacuateur de crue ont essentiellement consisté dans les opérations suivantes :

- destruction de l'évacuateur existant à la faveur de la baisse du plan d'eau pour vidange,
- reconstruction d'un seuil mince à la cote 321,10 NGF,
- construction d'une auge profonde en béton armé pour collecter les eaux.
- construction d'un coursier aval en béton armé.



Figure 4: Photographie du modèle réduit de l'évacuateur de crue (construit par le laboratoire de la CNR)

Les bajoyers du coursier et de l'auge ont été réalisés avec des voiles en béton préfabriqué. Cette technique, choisie par l'entrepreneur, a permis de réduire les temps de coffrage et ferrailage de ces voiles. Elle a également permis d'obtenir un rendu fini des surface hydraulique très lisse et dépourvu de petites aspirité. Toutefois, la mise en place de ces voiles préfabriqués a rencontré des difficultés pour parvenir à poser les voiles sur les attentes de ferrailage existantes dans le radier et pour réaliser les joints entre deux parties de voiles successives.

- Vidange de fond

Les calculs effectués sur la vidange du barrage ont montré la nécessité de revoir la taille de la vidange de fond selon les modalités suivantes :

- mise en place d'un entonnement en pied de tour de prise d'eau de section 1,40 x 0,80 m,
- construction d'un pertuis convergent dans la maçonnerie existante, pour cela, le plafond du pertuis de fond a été modifié avec un blindage,
- pose d'une nouvelle vanne de vidange de dimensions 0,90 m x 0,80 m à la cote 306,26 NGF. Cette vanne plate est motorisée.

En aval de la vanne, le pertuis de vidange a été équipé d'un blindage jusqu'à la vanne wagon existante afin de guider les écoulements et servir de coffrage perdu lors du chantier. Les écoulements se font à surface libre à l'aval de la vanne de vidange, au travers de la vanne wagon et dans la galerie maçonnée.

Avec ce dispositif le plan d'eau peut être complètement vidé en 12 jours et connaît une diminution de la poussée sur le barrage de plus de 50 % en un peu moins de 8 jours.

Toutefois, compte tenu des calculs menés sur la stabilité du parement amont, l'ouverture de la vidange de fond a été limitée à 20% en situation normale. L'ouverture à 100% en situation exceptionnelle est possible mais nécessite que l'exploitant actionne une clé de sécurité spécialement prévue pour. Ce dispositif permet de limiter les vitesses d'abaissement du plan d'eau lors des opérations d'entretien.

La galerie de vidange de fond existante a été prolongée par une galerie en béton armé sous la recharge aval de la digue. Compte tenu de la qualité de la fondation à cet emplacement la galerie a été construite sur 5 pieux.

- Tour de prise d'eau

La tour de prise d'eau a également fait l'objet d'une réhabilitation avec nettoyage et purge des joints, remplissage par mortier. Les parties immergées ont été reprises par scaphandrier.

Les ouvertures en tête de la tour et qui servaient d'évacuateur de crue des petits débits ont été obturées par un mur en béton armé habillé de maçonnerie pour l'esthétique de la tour.

Les vannes de régulation des débits restitués ont été conservées pour servir de batardeau à de nouvelles vannes mises en place à l'intérieur de la tour.

Ces nouvelles vannes sont de type glissière. Elles sont motorisées et équipées de commandes à distance depuis le local de commande.

- Equipements divers

Les passerelles par-dessus l'évacuateur de crue en rive gauche et pour accéder la tour de prise depuis la crête du barrage ont été entièrement renouvelées. Les anciennes structures métalliques étaient en effet corrodées et ne pouvaient plus être utilisées.

L'architecte paysagé a dessiné des passerelles épurées portées par des poutres HEB ajourées par des trous répartis régulièrement avec platelage en en caillebotis acier galvanisé et garde-corps inox

Le Maître de l'Ouvrage a également souhaité disposer des éléments suivants :

- alimentation électrique générale du barrage et du locale de commande,
- un éclairage sur la crête du barrage jusqu'à la tour de prise d'eau,
- des accès au parement amont en rive droit et rive gauche,
- des risbermes en aval permettant le fauchage par engins motorisés.

- Dispositif d'auscultation

Le dispositif d'auscultation du barrage a fait l'objet d'une rénovation complète. Les appareils mis en place sont les suivants :

- 1 capteur de niveau (mesure de la cote du plan d'eau),
- 2 seuils de mesure de débit automatisés (rive droite et rive gauche),
- 13 capteurs de pression interstitielle (répartis sur 5 profils amont aval),
- 17 piézomètres ouverts répartis (12 correspondants aux anciens piézomètres conservés et 5 nouveaux),
- 6 capteurs d'ouverture de fissure dans la galerie sous remblais,
- 17 bec verseurs au dessus des puits de décompression permettant de mesurer les éventuels débits de fuite indépendamment les uns des autres.
- une centrale d'acquisition enregistrement et de télégestion de l'ouvrage.

6. CONCLUSIONS

Le barrage de Torcy Neuf a fait l'objet d'un confortement et d'une mise à niveau complète permettant à l'exploitant de disposer d'un ouvrage répondant aux exigences réglementaires actuelles des barrages et réservoirs.

L'exploitation a été simplifiée, la sécurité de l'ouvrage a été augmentée vis-à-vis de la stabilité et du passage des crues.

Les études réalisées en avant projet ont permis de trouver des solutions optimisées pour réduire les travaux. Les études complémentaires menées en phase projet, notamment le modèle réduit hydraulique et les reconnaissances complémentaires, ont nécessité des adaptations du projet avant la phase travaux. En phase travaux quelques adaptations mineures ont été nécessaires.

L'ouvrage s'est comporté de manière satisfaisante lors de sa remise en eau.

7. RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Petits Barrages, recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi, éditions du Cemagref.
- [2] Guide pour le contrôle des barrages en exploitation, BETCGB.
- [3] Design of Small Dams, USBR.
- [4] Bulletins de la CIGB.
- [5] Eurocodes.