

Reconstruction du barrage de Chatou : retour d'expériences sur les travaux de génie civil

Reconstruction of the Chatou gated weir: Returns experiences of civil works

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

Philippe Castillo, Vincent Mouy, Céline Roche, TRACTEBEL ENGINEERING
Le Delage – 5 rue du 19 mars 1962 - 92622 Gennevilliers – FRANCE
Philippe-Michel.Castillo@gdfsuez.com, Vincent.Mouy@gdfsuez.com, Celine.Roche@gdfsuez.com

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

MOTS CLÉS

Barrage mobile, reconstruction, site urbain, travaux en rivière, enceinte batardeau, méthode observationnelle, risques géotechniques, crue de la Seine, reprises de bétonnage, ferrailage minimum, béton massif

RÉSUMÉ

Les travaux de reconstruction du barrage de Chatou constituent la plus importante opération jamais engagée sur la Seine par Voies navigables de France. Entièrement automatisé, le nouveau barrage assurera une régulation plus efficace et plus sûre du plan d'eau, tout en améliorant les conditions d'exploitation et de maintenance de l'ouvrage. Doté de trois passes équipés de clapets manœuvrés par des vérins hydrauliques, le nouveau barrage sera également équipé d'une passe à poissons. Coyne et Bellier (devenu par la suite Tractebel Engineering) a été en charge de la Maîtrise d'œuvre complète des travaux de génie civil. Le défi majeur a résidé dans la réalisation en Seine des piles et du radier d'une passe à l'intérieur d'enceintes batardeaux. Le succès de batardeaux étanches dépend essentiellement des conditions de battage des palplanches. Afin de s'accommoder des contraintes hydrauliques imposant de libérer la Seine de toute bouchure entre le 1^{er} décembre et le 31 mars, la Maîtrise d'œuvre a proposé un projet audacieux permettant de réaliser ces enceintes batardeaux dans les délais impartis, sans recours au traditionnel bouchon en béton immergé. La gestion des risques résiduels d'ordres géotechniques et hydrauliques a consisté lors des travaux en l'exécution de piézomètres en fond d'enceinte, complétés par un système d'auscultation en temps réel du comportement des rives. En outre, l'augmentation des quantités de ferrailage par application de l'Eurocode 2, a nécessité des adaptations rendues possibles par l'expérience de Tractebel Engineering dans les ouvrages hydrauliques.

ABSTRACT

The reconstruction of the Chatou gated weir is the largest operation ever undertaken on the Seine river by "Voies navigables de France". Fully automated, the new dam will ensure a more effective and safer control of the water level, while improving operating and maintenance conditions. With three flap gates, monitored by hydraulic jacks, the new dam will also be equipped with a fish pass. Coyne et Bellier (Tractebel Engineering) was responsible for the engineering of civil works. The major challenge has been the construction of dam pier and invert inside sheet pile cofferdams. The success of watertight cofferdam mostly relies on the sheet pile driving conditions in the anchoring soil. In order to accommodate hydraulic constraints imposing unleash clogging between December 1 and March 31, the engineer has proposed a bold plan to complete cofferdam enclosure in short time, without a submerged concrete plug as usual. Geotechnical and hydraulic residual risks have been managed by performing piezometers in the bottom of the excavation, complemented by a real-time auscultation system in order to monitor the banks. In addition, increased amounts of reinforcement in accordance with Eurocode 2, required modifications made possible by the experience of Tractebel Engineering in hydraulic structures.

1. CARACTERISTIQUES DE L'ENVIRONNEMENT DU PROJET

1.1 Les ouvrages existants

Après presque quatre-vingts années de service, l'ouvrage de régulation du bief de la Seine entre Suresnes et Chatou-Bougival, doit être remplacé par un nouveau barrage mobile entièrement automatisé. Le projet de reconstruction du barrage de Chatou comporte trois passes dont la bouchure est équipée de trois clapets manœuvrés à l'aide de vérins hydrauliques. La fonction hydraulique du nouveau barrage sera identique à celle de l'ouvrage ancien qui sera désaffecté puis démonté pour dégager la voie d'eau aval, après mise en service du nouveau barrage mobile.

L'ancien barrage, actuellement en passe d'être démolí, a été construit en 1933 au PK (44) environ. En 1964, la démolition de sa travée rive gauche, laisse la place à la construction de l'écluse de navigation qui se déroule en 1965 et 1966. Le seuil amont de l'écluse à (+18.14) – IGN69 assure un mouillage de 5,42 mètres. Le sas de l'écluse a une largeur de 18 mètres pour une longueur de 185 mètres. Les trois passes de largeur libre 30,50 mètres régulent le bief de Suresnes / Chatou-Bougival à la cote de Retenue Normale Amont (+23.56) – IGN69 aux moyens de vannes à double-corps, manœuvrées à partir du pont supérieur à (+40.50) – IGN69 à l'aide de chaînes de type Galle. Le radier à la cote (+15.80) – IGN69 a une longueur de 18 m avec une épaisseur de 2 m environ. Les piles maçonnées ont une longueur de 20 m et une épaisseur de 4,50 m.

Un batardeau amont, en une seule pièce, est manœuvré à l'aide d'un double pont transbordeur dont le chemin de roulement est installé sur le pont supérieur à la cote (+43.25) – IGN69. Depuis plus de quinze ans, le batardeau amont est stocké au droit de la passe rive droite où il repose sur des appuis fixes. Une passerelle technique relie les deux rives à la cote (+24.30) – IGN69 environ. Cette passerelle est relevée lors des mouvements verticaux des vannes, en période de crues.

Sur l'îlot entre le barrage et l'écluse se trouve la salle de contrôle actuelle qui sera remplacée par un bâtiment qui regroupera à terme le contrôle commande du nouveau barrage et de l'écluse existante.

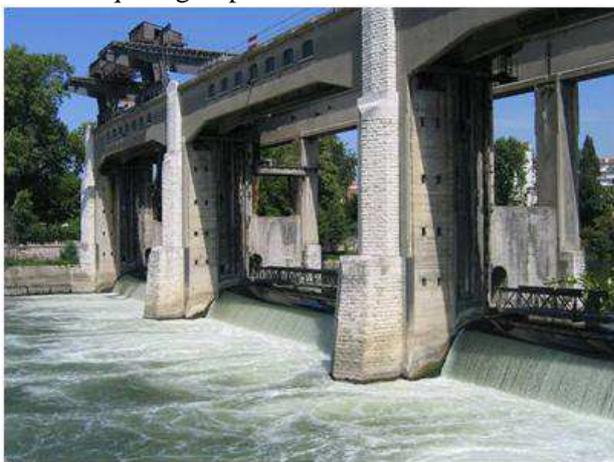


Photo 1 : Ancien barrage (vue aval)



Photo 2 : Ancien barrage (vue amont)

Le site du barrage de Chatou est situé en zone urbaine à proximité immédiate du quai du Nymphée (ville de Chatou, Yvelines, en rive droite de la Seine), qui constitue un axe de passage fortement fréquenté pendant les heures d'arrivée et de sortie de bureaux, ce qui constitue une contrainte majeure d'accès au chantier. En outre, la proximité du domaine public conduit également à exporter des risques vis-à-vis de la stabilité des berges et du bâti avoisinant en rive droite pendant les travaux de reconstruction du nouveau barrage.

1.2 Le contexte hydraulique

Les crues de la Seine à Paris sont répertoriées depuis 1733, elles s'observent principalement entre décembre et mars et plus rarement en été (coups d'eau générés par des pluies orageuses). La crue maximale historique est la crue de 1910, donnée avec un débit de pointe de 2 180 à 2 405 m³/s (suivant les sources) et enregistrée à la station d'Austerlitz à Paris. Les crues récentes des années 2000 ont atteint les débits de 1 510 m³/s (2001), 1 475 m³/s (2000), 1 200 m³/s (2002 et 2003) et enfin en cours de travaux 1 130 m³/s le 28 décembre 2010 (période de retour TMR de l'ordre de 3 ans).

TMR (années)	2	3	5	10	50	100
QP (m ³ /s)	1 000	1 130	1 400	1 790	2 120	2 400

Tableau 1 : Débits de pointe ou instantané maximum QP en m³/s en fonction de la période de retour TMR

Le débit moyen de la seine est de 450 m³/s environ. Le débit moyen d'étiage est de l'ordre de 100 m³/s. Le bief aval au barrage de Suresnes comporte deux bras : le bras de Marly, régulé par le barrage de Bougival et le bras de la Rivière Neuve, régulé pour le barrage de Chatou. Lorsque le débit de la Seine mesuré à Paris-Austerlitz est de l'ordre de 800 m³/s, il est admis que le débit, au barrage de Chatou, est d'environ de 550 m³/s sous la cote amont (+23.56) – IGN69. En période de crues, il est admis que les deux tiers du débit de la Seine, mesurés à Paris-Austerlitz, passent dans le bras de la Rivière Neuve. Dans ce contexte, le débit d'effacement des vannes du barrage de Chatou se situe à 800-900 m³/s. La crue de décembre 2010 est passée sous la cote (+23.17) – IGN69 à Chatou pour un niveau de Retenue Normal Aval de (+20,31) – IGN69.

Les photos n°3 et n°4 montrent respectivement les conditions hydrauliques rencontrées au pic de la crue le 28 décembre 2010 au droit de l'ancien barrage effacé (vannes levées) et de la passe rive gauche du nouveau barrage en cours d'achèvement avec le recépage en urgence de l'enceinte batardeau nécessaire à la l'ouverture de la bouchure hydraulique.



Photo 3 : Ancien barrage effacé le 28/12/2010
(vue vers l'aval de l'estacade de chantier)



Photo n°4 : Enceinte batardeau en cours de recépage
(vue vers l'amont depuis l'estacade de chantier)

1.3 Le contexte géotechnique

En Seine, le substratum crayeux est recouvert d'une épaisseur de sédiments de 0,50 m à plus de 6 m côté berge rive droite. La cote du toit de la craie saine varie entre les cotes (+10.80) et (+13.30) – IGN69, avec une épaisseur de craie altérée d'environ 1 m voire 2 m très localement. La craie blanche du Campanien renferme quelques silex de taille centimétrique. En rive droite au droit de la berge, une épaisseur de dix mètres de remblais et alluvions repose sur le substratum de craie pour lequel l'horizon sain a été identifié entre les cotes (+15.00) et (+17.00) – IGN69. Sur l'îlot central entre barrage et écluse, le toit de la craie saine se situe entre la cote (+13,70) et (+14,70) – IGN69, se prolongeant sous la fondation du bajoyer de l'écluse.

La formation crayeuse s'est révélée globalement homogène en Seine au droit de l'implantation du nouveau barrage, avec les caractéristiques suivantes :

Mesures en laboratoire et in situ	Craie saine	Craie altérée
Poids volumique déjaugé γ' [kN/m ³]	9 à 10	9 à 10
Poids volumique sec γ_d [kN/m ³]	14,6 à 16,7	14,6 à 15,3
Cohésion effective c' [kPa]	60 à 110	10 à 30
Angle de frottement effectif φ' [°]	39 à 42	38 à 40
Pression limite nette pl^* [MPa]	3,5 à >4,5	1,2 à 3,5
Module pressiométrique E_M [MPa]	50 à 120	10 à 50
Perméabilité équivalent k_c [m/s]	7.10^{-7} à 3.10^{-6}	-

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques et hydrauliques du substratum crayeux

Lors de la réalisation des premiers travaux en périphérie de l'îlot, il a été mis en évidence en rive gauche des formations indurées composées essentiellement d'alternances de marno-calcaires et de craie grésifiée, pour lesquels les résistances étaient bien supérieures à celles de la craie saine, empêchant localement le battage des palplanches, comme l'illustrent les photo n°5 et 6 ci-après, avec recours au trépanage si nécessaire.



Photos 5 et 6 : Paires de palplanches PU32 déchirées après battage et extraction de la zone indurée

2. CARACTERISTIQUES DE L'OPERATION DE RECONSTRUCTION

2.1 Les principaux intervenants

De près de 60 millions d'Euros, l'opération de reconstruction du barrage de Chatou et de démolition de l'ancien barrage constitue le chantier ponctuel le plus important jamais réalisé par Voies navigable de France, Maître d'Ouvrage, cofinancé par la Région Ile de France, l'Agence de l'eau Seine-Normandie et l'Union européenne (passe à poissons).

Le groupement de Maîtrise d'œuvre, chargé de la conception et du suivi d'exécution des travaux est constitué de Tractebel Engineering France (Coyne et Bellier) en tant que mandataire, SPRETEC et Luc Weizmann Architecte. Coyne et Bellier a été en charge de la conception des ouvrages de génie civil et du pilotage du projet depuis son origine en 2004.

Le groupement d'entreprises adjudicataire des travaux est composé de Bouygues Travaux Publics (mandataire), Bouygues TP Région France et EMCC. Les travaux ont démarré en avril 2009 pour une mise en service du nouveau barrage en juillet 2013.

2.2 Les fonctionnalités du nouveau barrage

Compte-tenu du caractère très sensible du site où il s'implante, le projet a fait l'objet d'une recherche d'insertion paysagère, ainsi que d'un travail architectural soigné, dans le souci d'une cohérence entre fonctionnalités techniques et dessin de chacune des parties de l'ouvrage. L'aménagement architectural et paysager du site est prévu autour de l'aménagement naturel des berges entre l'ouvrage ancien déconstruit et le nouveau barrage. Le projet de reconstruction est décrit par Boidy et al [1].

Le nouveau barrage mobile, implanté à l'amont de l'ouvrage existant comporte trois passes équipés de clapets de 30,50 m de largeur libre au-dessus d'un radier situé à la cote (+15.80) et de 26 mètres de longueur. La largeur des piles est de 4 mètres. Les trois clapets de dimensions 32,50 m x 9 m sont manœuvrés par deux vérins hydrauliques, mis en place au niveau de chaque pile et culée sur la plate-forme technique située à la cote (+26.91), comme indiqué en figure n°1. Les passes sont batardables pour la maintenance à l'aide de batardeaux flottants, stockés sur l'île de Chatou, à l'amont du barrage, sur une aire, aménagée à cet effet.

La passe rive gauche et la passe centrale seront navigables, en période de hautes eaux après effacement du barrage ; à ce titre, le gabarit de navigation est dégagé sous la cote (+32.37). Pour se faire, le clapet est couché dans sa fosse, libérant ainsi toute bouchure hydraulique comme indiqué en figure n°1. La passe rive droite ne comporte aucune contrainte de navigation. Une passerelle, de largeur 2,20 m, relie les deux culées du barrage mobile, et est accessible depuis l'îlot à partir du bâtiment de commande.

Sur l'îlot, au droit de la culée rive gauche du barrage mobile est aménagée une passe à poissons à large spectre (y compris pour les anguilles) avec seize bassins successifs à fentes et munie d'un dispositif d'attrait.

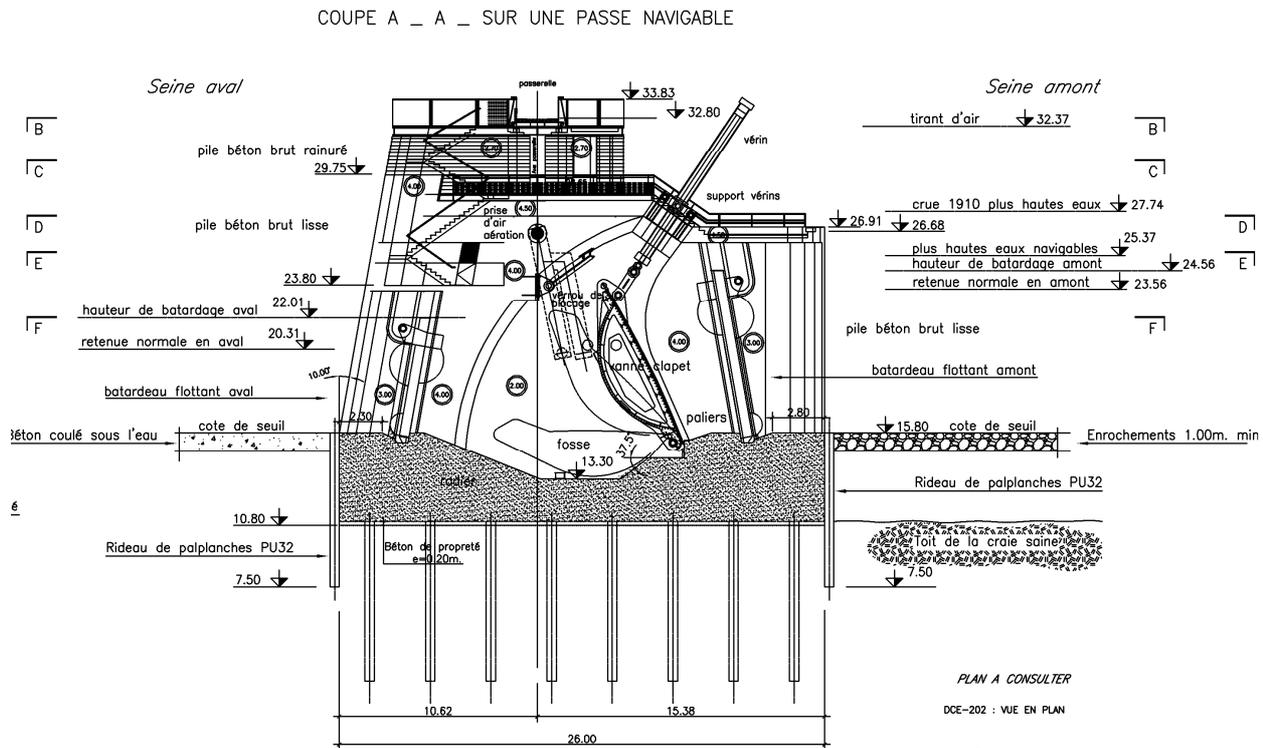


Figure 1 : Coupe en travers d'une passe navigable du nouveau barrage de Chatou (cote NGF - IGN69)

2.3 Les contraintes hydrauliques du programme de reconstruction

Le programme de reconstruction du nouveau barrage s'inscrit dans un délai global de trente-six mois pour les travaux en Seine, hors aménagements des berges, de l'îlot et de la passe à poissons.

Les contraintes d'exploitation du Maître d'Ouvrage se traduisent, au niveau du programme des travaux, par une interdiction des travaux en rivière du 1^{er} décembre de l'année (n), au 31 mars de l'année (n+1). Chacune des trois passes du nouveau barrage a fait l'objet d'une campagne annuelle de travaux. Le niveau de protection du chantier en Seine a été arrêté à hauteur d'une crue décennale, déterminée de mars à décembre inclus pour un nombre de passes non obstruées par les installations provisoires de chantier, et équivalentes à 2,8 passes au lieu de 3.

Dans ces conditions, la crue de chantier, calculée sur la période de mars à décembre inclus, est de l'ordre de 1 260 m³/s (référence Paris Austerlitz). Il a donc été réalisé des enceintes batardeaux en Seine permettant de garantir la non-submersion du chantier à concurrence de la crue de fréquence d'occurrence 10 ans, en fixant la cote d'arase des palplanches à (+24,80) – IGN69.

Pendant les travaux, le chantier a été confronté à un épisode de crues de décembre 2010 à janvier 2011. Les difficultés rencontrées lors des travaux de la première passe rive gauche ont conduit à l'instruction d'une demande de dérogation aux contraintes réglementaires pour poursuivre et achever les travaux dans l'enceinte batardeau après le 30 novembre 2010. Les conditions hydrauliques rencontrées, proches d'une crue décennale pour la période de mars à décembre, ont confirmé a posteriori que :

- des crues significatives perturbant les travaux en Seine sont susceptibles de se produire dès le mois de décembre et que la contrainte hydraulique pesant sur l'opération était pleinement justifiée ;
- les travaux à réaliser sur une passe nécessite une coordination éprouvée entre les différents intervenants pour la gestion des interfaces et la gestion des risques (notamment géotechniques et hydrauliques) afin de maîtriser les incidences planning sur les travaux de génie civil.

3 TRAVAUX DE GENIE CIVIL EN SEINE

3.1 Réalisation des enceintes batardeaux en palplanches

L'exécution des travaux de génie civil en rivière nécessite la réalisation préalable d'une enceinte batardeau assurant une étanchéité suffisante pour permettre le bétonnage du radier. Différentes options sont envisageables en fonction des caractéristiques mécaniques et hydrauliques du substratum.

Deux principaux types de solutions peuvent être classiquement mis en œuvre :

- dans des terrains de compacité « moyenne » : le fichage d'un rideau continu en palplanches ou si besoin d'un rideau alterné de type pieux H avec palplanches AZ ; dans ce dernier cas, la fondation peut nécessiter un traitement par injections pour assurer l'étanchéité périmétrale de l'enceinte ;
- dans des terrains très compacts : la mise en œuvre de tubes métalliques (pieux tubulaires) fichés dans la fondation rocheuse permettant le maintien des palplanches avant la pose des butons ; dans ce cas, des éléments d'étanchéité intercalaires (palplanches) sont scellées en pied par du béton (avec traitement éventuel par injections), des liernes métalliques permettant la liaison tube-palplanche, qui transmettent la poussée hydrostatique exercée sur les palplanches aux éléments porteurs.

La réussite de la réalisation d'un rideau de palplanches fiché en continu dépend essentiellement de l'homogénéité des conditions de battage, dictées par les caractéristiques des terrains dans lesquels viennent s'ancrer les palplanches. La craie constitue un matériau adapté dès lors que la présence de blocs de silex reste faible et que la résistance intrinsèque du matériau n'excède pas 4 à 5 MPa de pression limite et 100 MPa de module pressiométriques. Par ailleurs, le caractère cicatrisant de la craie constitue une caractéristique très favorable vis-à-vis de la limitation de la perméabilité relative du rideau de palplanches.

Pour le site de Chatou, au regard des caractéristiques de la craie, le choix du profilé s'est donc orienté vers des palplanches à forte inertie de type PU32, battues par paires et ancrées sur une profondeur de 7 m dans la craie saine et altérée, afin de permettre même en cas de présence locale de blocs décimétriques de silex un fichage suffisant des rideaux. Aucun problème de refus n'a été rencontré en section courante hormis au contact des rives, notamment au droit de zones indurées et au contact des structures existantes.

Les chiffres clés du projet par enceinte sont les suivants :

- excavation à l'intérieur des enceintes batardeaux : fond de fouille 13 mètres environ sous le niveau de la Seine avec 3 700 m³ de déblais hors prédragage des sédiments pollués ;
- mise en œuvre de 700 tonnes de palplanches S 355 GP PU32 et de 400 tonnes de liernes et butons assurant le soutènement de l'enceinte d'une passe.

3.2 Stabilité du fond de fouille

La réalisation des piles et du radier d'une passe nécessite la mise à sec annuellement d'une enceinte batardeau. Dans les conditions géotechniques décrites précédemment, il a été considéré de façon audacieuse en phase conception que le dimensionnement des enceintes batardeaux pouvait s'appuyer principalement sur les caractéristiques intrinsèques de la craie saine, recherchée en fond de fouille.

Afin de s'accommoder des contraintes hydrauliques en Seine imposant de libérer toute bouchure entre le 1^{er} décembre et le 31 mars inclus, Coyne et Bellier Tractebel Engineering France a proposé un projet d'enceintes batardeau sans réalisation préalable de bouchon en béton immergé afin de garantir les délais d'exécution très contraignants au regard du volume de travaux à engager sur huit mois.

Sur la base des résultats des campagnes de reconnaissances géotechniques successives, qui ont mis en évidence des caractéristiques géotechniques suffisantes et homogènes, il a été maintenu en phase d'exécution le principe d'enceintes batardeaux ancrées dans la craie saine et sans apport de béton immergé. La stabilité de ces enceintes est assurée par un système de liernes et butons venant compléter le soutènement apporté par la butée de pied générée par les seuls terrains de fondation, comme indiqué en photo n°7.



Photo 7 : Terrassement du fond de fouille

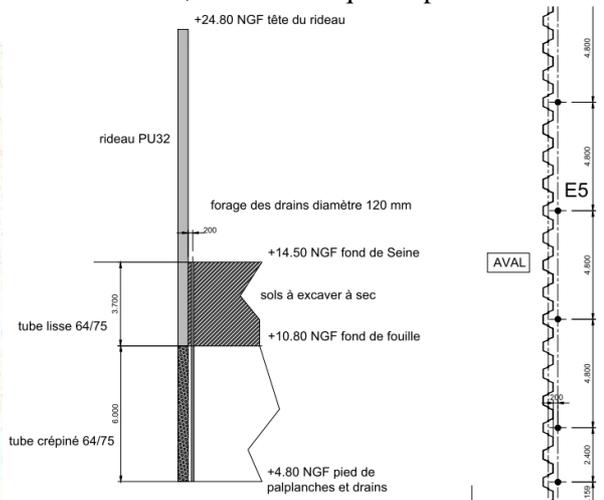


Figure 2 : Piézomètre en périphérie d'enceinte E5

La gestion des risques résiduels d'ordres géotechniques et hydrauliques a consisté en phase d'exécution en la réalisation de piézomètres de suivi en périphérie d'enceinte batardeau dans les creux de

palplanches, tel qu'indiqué en figure n°2. Ces dispositions techniques visaient à identifier une éventuelle alimentation latérale en eau d'un plan de faiblesse dans le substratum crayeux, générée potentiellement lors du battage des palplanches. Une telle alimentation peut être causée par le décollement du rideau associé à un dégrafage des palplanches au niveau des serrures, défaut pour lequel l'interprétation des courbes de battage s'est relevée à elle seule insuffisante pour identifier et quantifier les risques résiduels.

Chaque étape de travaux a fait l'objet en comparaison des profils théoriques d'un suivi piézométrique afin d'anticiper autant que possible d'éventuels augmentations de sous-pressions ou de venues d'eau qui pouvaient menacer la stabilité locale d'un coin de fond de fouille et remettre en cause l'intégrité du radier. De tels phénomènes se sont manifestés à trois reprises lors des travaux d'excavation en fond des enceintes batardeaux au contact des rives (et de leurs éléments de soutènement), qui sont sujettes à des singularités de terrains imprévisibles avant et pendant les travaux.

Dès lors qu'une brèche s'est déclarée au droit d'une serrure de palplanches, le traitement curatif rendu nécessaire, consiste à rétablir les niveaux d'eau et à disposer avec l'aide de plongeurs un renfort en béton immergé confiné derrière une plaque en acier fixée sur les palplanches (photos n°8 et 9). Cette opération doit être complétée le cas échéant par des injections à réaliser en pied extérieur de l'enceinte batardeau.



Photos 8 et-9 : Renforts en béton immergé dans l'enceinte passe rive droite

Photo 10 : Pieu existant

3.3 Confortement des berges

Lors de la réalisation des rideaux de palplanches au contact des berges ont été rencontrés des éléments de soutènement non répertoriés sur les plans de récolement d'origine. Pour certains de ces éléments, les incidences ont été par chance peu impactés (comme le pieu épousé en creux de palplanche de la photo n°10), mais pour d'autres cela a conduit à recourir à des renforcements temporaires des rideaux afin de permettre la traversée voir la destruction des existants en charge.

Au contact de la rive droite et à l'approche immédiate du quai du Nymphée, la dernière enceinte batardeau a dû être modifiée pour permettre le renforcement provisoire du quai avant achèvement du rideau tirant côté terre nécessaire à la fermeture de cette même enceinte. Ce renforcement a été apporté par l'intermédiaire d'une enceinte batardeau E6 plus petite et remblayée par du sablon pour apporter une butée de pied de substitution suffisante en phase transitoire lors de la destruction des existants, jusqu'à mettre en tension les tirants actifs, nécessaires pour la poursuite des excavations dans la grande enceinte E5.

Le quai du Nymphée devant être maintenu sous circulation pendant toute la durée des travaux, un suivi du comportement du rideau en temps réel a été rendu nécessaire faute de connaître le degré de participation des existants au soutènement du dit quai. La méthode observationnelle a permis de s'assurer que les déplacements mesurés sur la chaussée et les avoisinants restaient toujours inférieurs aux seuils de vigilance.

Il a été notamment relevé un déplacement maximum du rideau en tête de rideau de 5 à 6 mm vers la berge en 6 heures de temps suite à la démolition d'une dalle existante dans le coin aval de l'enceinte au contact de la rive droite (figure n°3). Un mouvement horizontal global de l'ordre de 26 mm a été mesuré en tête de rideau en limite du seuil de vigilance, estimé à 30 mm au regard du modèle numérique accompagnateur des travaux. L'ensemble des mouvements mesurés ont été sans conséquences sur les existants pour lesquels le suivi des ouvertures de fissures sur les murets n'a rien révélé de significatif.



Photo 11 : Enceinte rive droite

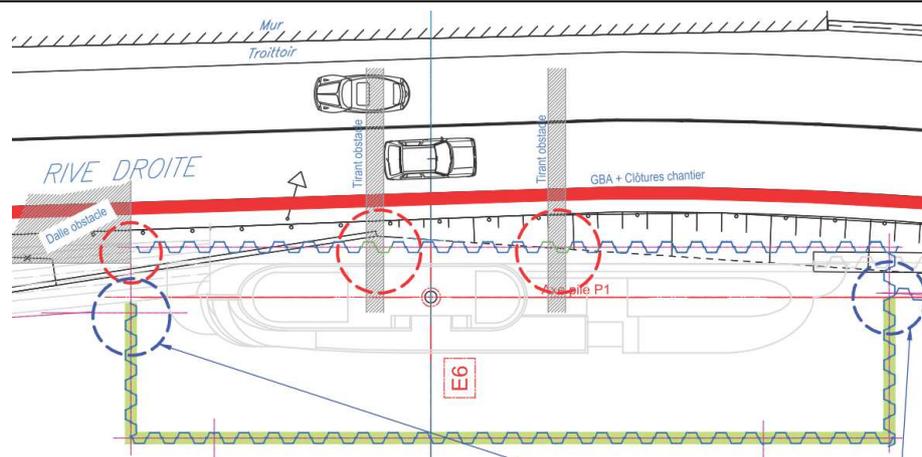


Figure n°3 : Implantation des obstacles en rive droite à traiter

3.4 Mise en œuvre des bétons de masse

3.4.1 Caractéristiques des bétons de masse

Pour chacune des trois passes du nouveau barrage, les volumes de béton engagés ont été de 1 000 m³ par pile (ou culée de rive) et 3 000 m³ par radier entre chaque pile. La phase de bétonnage d'une durée réduite de 4 mois dans un délai réglementaire de 8 mois pour les travaux en Seine, a conduit à une cadence de bétonnage élevée et ponctuée par des contraintes techniques et des contraintes de circulation.

Le radier est un massif d'environ 22 mètres de largeur et d'épaisseur variable de 2,10 m en partie centrale à 4,80 m en extrémités amont et aval. Le radier a été coulé en deux nappes sur l'épaisseur, une première couche de 2,10 m puis une seconde pour parachever le radier.

Les opérations de bétonnage ont nécessité des adaptations pour tenir compte :

- des contraintes techniques générées par la mise en place du ferrailage en deux postes et le montage des coffrages en temps semi-masqué pour optimiser les cadences des travaux de génie civil ;
- des contraintes de circulation rendant nécessaire la réalisation des bétonnages par plots inférieurs à 500 m³ sur la plage horaire 8h00 à 20h00 ; exceptionnellement, il a été autorisé de réaliser en continu sur des plages horaires élargies (6h00 à 24h00) les plots supérieurs à 500 m³ (bajoyers des piles et culées) à raison de deux jours par passe.

Les bétons de masse ont été soumis à la validation architecturale de la Maîtrise d'œuvre pour la teinte et l'aspect. La formule du béton retenu C40/50 XF1 G1 CEM III SC5, est composée de granulats à diamètre réduit pour faciliter la mise en œuvre souvent délicate dans des zones exigües. Ces éléments assurent de plus un aspect plus lisse des parements vus qu'un béton à granularité plus grossière classiquement recommandé pour des bétons de masse d'ouvrages hydrauliques. Un ciment à faible chaleur d'hydratation de classe 32,5 a été utilisé, et la température a été suivie lors des bétonnages pour maîtriser les phénomènes de retrait.

3.4.2 Ferrailage du radier

En phase d'exécution des travaux de génie civil, le ferrailage minimum du radier requis au sens des Eurocodes est ressorti significativement supérieur à celui classiquement prévu par son concepteur Coyne et Bellier par application des recommandations internationales appliquées aux barrages et issu de son expérience dans le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques massifs.

De fait, les Eurocodes, imposés pour les ouvrages de génie civil depuis 2009, sont essentiellement prévus pour la construction des bâtiments à voile mince ou d'ouvrages d'arts courants. Les barrages, qui sont des ouvrages massifs se trouvent en limite d'application des Eurocodes, qui ne couvrent pas le dimensionnement des barrages, mais sont néanmoins le règlement en vigueur pour les ouvrages de génie civil en France, auxquels s'apparentent règlementairement les barrages mobiles.

Ainsi, le cas d'un radier bridé à sa fondation et soumis à du retrait est courant dans la réalisation d'ouvrages hydrauliques massifs, mais n'est pas abordé en détail dans l'Eurocode 2 [2]. La stricte application du code conduit à appliquer a minima le taux forfaitaire de ferrailage minimal à la traction. La formule correspondante dans l'Eurocode 2 est basée sur une approche laboratoire difficilement transposable dans le cadre des ouvrages de grande épaisseur. Ainsi, un facteur réducteur est imposé en fonction de l'épaisseur de la pièce. Or cette mesure se base sur des champs (0-30, 30-80 cm) sans commune mesure avec le cas des sections de béton en jeu supérieure à 2 m, dans les grands ouvrages du génie civil tels que les barrages.

L'application des règlements sans prise en compte des retours d'expériences des concepteurs, conduit donc à des surdimensionnements en termes de quantités d'armatures. Tractebel Engineering France (Coyne et Bellier) a donc œuvré à diminuer les quantités d'acier destinées à maîtriser la fissuration du béton de masse jusqu'en dessous de la quantité forfaitaire de « ferrailage minimal à la traction » définie par l'Eurocode 2. Notre attention s'est donc portée à ce moment sur la notion de ferrailage minimal qui conduisait encore aux yeux de la Maîtrise d'œuvre à des quantités excessives d'armatures.

La figure n°4 représente le ferrailage du radier du barrage de Chatou après application des leviers d'optimisations apportés par Tractebel Engineering France (Coyne et Bellier).

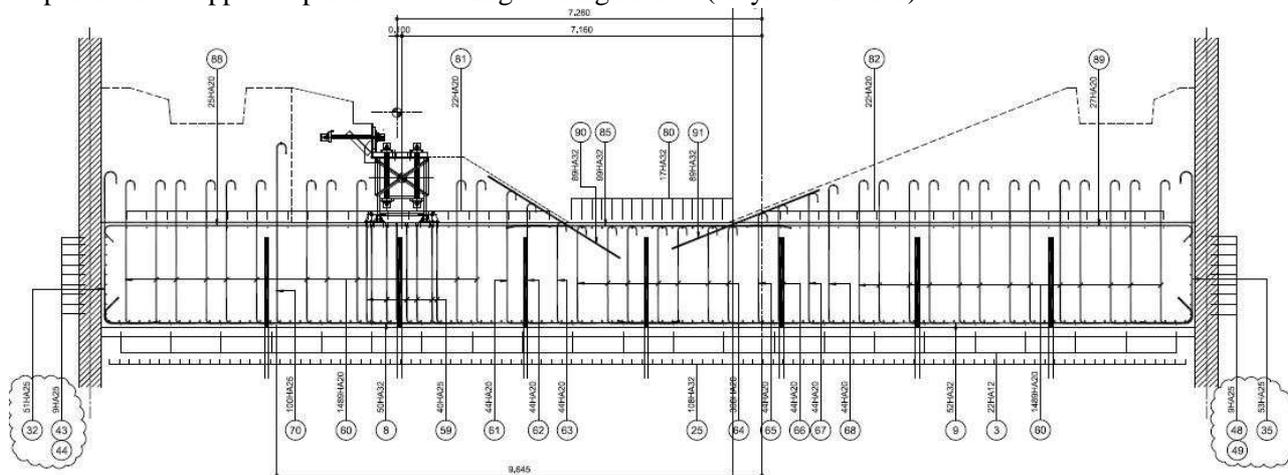


Figure 4 : Coupe transversale du ferrailage du radier du barrage de Chatou

Les pistes de recherches et d'innovations envisageables pour poursuivre les actions visant à limiter les quantités de ferrailage, sont pour une part de chercher à mieux appréhender et modéliser le phénomène de retrait d'une pièce bridée à sa fondation, pour éviter d'appliquer la quantité forfaitaire hautement enveloppe de « ferrailage minimum à la traction ». D'autre part, il conviendrait d'étudier les possibilités de réduire le coefficient réducteur de l'Eurocode 2, lié à l'épaisseur dans la formule du ferrailage minimum. Dans ce cadre, le dimensionnement des ouvrages devrait pouvoir se justifier sur la base d'études thermomécaniques, prenant en compte non seulement le retrait endogène, mais également le retrait thermique. La mise en place de bétons à faible chaleur d'hydratation permettrait la diminution des quantités de ferrailage à mettre en place, ce que les règlements habituels ne permettent pas.

3.4.3 Coffrage et reprises de bétonnage

Pour assurer un coffrage rapide des plots du radier, les banches n'ont pas toujours pu être adaptées, le radier étant découpé en plots de taille réduite et assez complexe. La solution de métal déployé (type *Strémaform*) avec soutènement par bastaing, étais et tiges de maintien, reliées à des ancrages soudés aux palplanches a permis d'optimiser cet atelier. La flexibilité de mise en œuvre du métal déployé permet par ailleurs des adaptations aux zones de reprises pour assurer aux équipes de ferrailage un travail continu.

Les piles et culées ont été coffrées par des structures préfabriquées de contreplaqués, assemblées sur une charpente bois, et réutilisées pour chaque pile. Ces structures permettant un coffrage en sandwich de la pile étaient soutenues par deux murs de banches superposées d'environ 26 m de longueur sur 8 m de haut [3].



Photo 12 : Coffrage de la culée rive droite



Photo 13 : Plot coffré par métal déployé

Dans ce contexte, les contraintes exposées au §3.4.1 pesant sur les conditions d'accès à l'ouvrage pour les opérations de bétonnage ont augmenté de manière considérable le nombre de reprises de bétonnage entre plots aussi bien verticalement qu'horizontalement.

Les reprises de bétonnage ont été inspectées avec attention pour assurer l'étanchéité du radier sous les clapets. Le radier doit jouer aussi bien un rôle structurel en support des ancrages des charnières du clapet, qu'un rôle hydraulique en garantissant une étanchéité relative et en limitant les infiltrations d'eau. Tout cheminement d'eau par reprise de bétonnage mal traitée conduit à compromettre la durée de vie normale du béton et des armatures, prévue de 100 ans pour les ouvrages de génie civil.

Le traitement des reprises de bétonnage a été effectué dans l'esprit des recommandations FFB / SETRA de juin 2000 [4] en vue d'obtenir une rugosité améliorée suivant la méthodologie suivante :

- Traitement par eau sous pression peu après le début de prise, validé sur planches d'essais pour garantir le décapage en surface de toute laitance ; pour les surfaces horizontales, le traitement a été de type « eau sous pression (TS3) » et « élimination de l'eau libre (EL) » avec emploi si nécessaire d'un désactivant ou d'un retardateur de prise (DR) après approbation de la Maîtrise d'œuvre ;
- Dépose systématique du grillage ou métal déployé et nettoyage de la surface au jet à très haute pression, voire repiquage de surface si nécessaire suivant l'âge du béton ;
- Mise en œuvre de formes de pente et de puisards permettant d'évacuer les eaux chargées lors des phases de nettoyage, et ainsi d'éviter la sédimentation sur les reprises de bétonnage.

Les travaux de reprises de bétonnage ont été complexifiés par la nécessité de recourir à des bétonnages par plots (cf. §3.4.1), ce qui a conduit à transposer ces tâches, habituellement réalisées en temps masqué, sur le chemin critiques des travaux de génie civil. Le respect des délais partiels pour l'achèvement de chacune des passes du barrage, a été rendu possible sans déroger à la qualité escomptée, par une gestion anticipée des interfaces entre les travaux de génie civil et la pose des équipements hydromécaniques. La structure du Groupement d'entreprises avec un mandataire ensemble a été le vecteur de cette réussite.

4 CONCLUSIONS

Le nouveau barrage de Chatou garantie désormais la navigation sur l'un des axes de transport de marchandises les plus importants en tonnage de France, entre les ports du Havre et la région Ile de France. La reconstruction d'un tel ouvrage constitue pour Voies navigables de France un enjeu majeur en termes de modernisation et de fiabilisation de la navigation sur la Seine aval.

La mise en service du nouveau barrage de Chatou en juillet 2013 se poursuivra par les travaux de démolition de l'ancien barrage (en premier plan de la photo n°14) et la mise en valeur scénographique des équipements de manœuvre des vannes de l'ancien barrage. Ces derniers travaux apporteront l'opportunité d'une requalification générale du site par une valorisation à la fois urbaine, paysagère et environnementale avec le franchissement de l'ouvrage rendu bientôt possible pour les espèces piscicoles migratrices.



Photo 14 : Vue depuis l'aval sur le nouveau barrage de Chatou après mise en service en juillet 2013

La suppression en phase de projet du bouchon en béton immergé en fond d'enceintes batardeaux et la mise en place d'une méthode observationnelle en phase d'exécution pour le suivi du comportement de la berge rive droite et du radier jusqu'à achèvement de ce dernier, a contribué à garantir le délai d'exécution des travaux en rivière pour lesquels les critères de crue retenus au niveau du projet se sont avérés en cohérence à la réalité du risque hydraulique.

Les contraintes particulières pesant sur l'opération de reconstruction du nouveau barrage ont conduit la Maîtrise d'œuvre en concertation avec le groupement d'Entreprises à trouver les leviers en terme d'études et de méthodes garantissant la réalisation de ces ouvrages tout en maintenant le niveau d'exigence élevé pour la qualité des parties d'ouvrages immergées.

L'augmentation des quantités de ferrailage par application de l'Eurocode 2 fait partie des contraintes pour lesquelles Tractebel Engineering France (Coyne et Bellier) a mis à contribution toute son expérience dans le domaine des ouvrages hydrauliques, afin d'en maîtriser les impacts, et de garantir le succès de ces travaux dans les délais impartis. Tractebel Engineering France (Coyne et Bellier) compte poursuivre son action de développement dans le sens d'une meilleure optimisation des ferrailages des bétons massifs à la lumière d'une exploitation des recommandations de l'American Concrete Institute, ainsi que par des actions de recherches, s'appuyant sur le projet de recherche CEOS, auquel Tractebel Engineering France est associé.

Ces travaux de recherches pourraient aboutir à proposer des méthodes de calcul du ferrailage prenant davantage en compte les phénomènes physiques à l'origine des mécanismes de la prise du béton (forme et dimensions de l'ouvrage, chaleur d'hydratation du béton, température extérieure, capacité calorifique et isolation thermique des coffrages...).

5. RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Boidy E., Costaz J., Reconstruction du barrage de Chatou, revue Travaux n°837, pp. 34-37, janvier 2007.
- [2] AFNOR, Eurocode 2, normes NF EN 1992-1-1 et NF EN 1992-1-1/NA
- [3] Duramé N., Debaene C., Un nouveau barrage remplace l'ancien à Chatou, revue Travaux n°887, pp. 58-69, mars-avril 2012.
- [4] Recommandations pour l'exécution des reprises de bétonnage, document FFB/SETRA de Juin 2000.

6. REMERCIEMENTS

Tractebel Engineering France (Coyne et Bellier) remercie chaleureusement la direction du Service Technique de la Voie d'Eau de Voies Navigables de France pour sa participation à la relecture du présent article.