

Réhabilitations successives du barrage d'Etables

Many Refurbishment of Etables dam

Gaëtan DAUTOIS, TRACTEBEL ENGINEERING
Le Delage – 5 rue du 19 mars 1962 – 92622 Gennevilliers – FRANCE
Tel. : +33 4 78 63 69 28, Fax : +33 4 78 63 69 29, Courriel : gaetan.dautois@gdfsuez.com

Olivier JULLIEN, TRACTEBEL ENGINEERING
Le Delage – 5 rue du 19 mars 1962 – 92622 Gennevilliers – FRANCE
Tel. : +33 4 78 63 69 18, Fax : +33 4 78 63 69 29, Courriel : olivier.jullien@gdfsuez.com

Robin FONDRAZ, Ville de SAINT CLAUDE
Services Techniques
Tél. : +33 3 84 45 79 66, Fax. : +33 3 84 45 28 81, Courriel : robin.fondraz@mairie-saint-claude.fr

MOTS CLÉS

Béton, érosion, fuites, galerie, piles, culées, seuils, coursiers, mortier hyper résistant, béton projeté, injections chemisage.

RÉSUMÉ

L'aménagement hydroélectrique d'Etables est un monument du patrimoine de la Ville de Saint Claude dont l'histoire est fortement liée à celle de la vallée. La Ville de Saint Claude s'emploie à maintenir en état l'aménagement pourtant touché par une vieillesse précoce due aux faiblesses du béton dont il est constitué.

Depuis sa mise en service en 1932, le barrage d'Etables a connu plusieurs campagnes de travaux visant à conforter le barrage lui-même, sa fondation ainsi que la galerie d'amenée des eaux vers l'usine hydroélectrique de Porte Sachet.

La matrice du béton d'origine du barrage est très hétérogène et globalement de qualité médiocre. Le béton est poreux et possède une densité faible de l'ordre de 2 t/m³.

Par ailleurs, fortement chargés en sables et graviers, les écoulements de la Biemme érodent les surfaces hydrauliques du barrage, d'autant plus que le béton est faible. Ainsi, les avant becs des piles et les coursiers des passes évacuatrices de crues du barrage sont fortement dégradés.

La galerie d'amenée présente des fissures longitudinales et, dans une moindre mesure, transversales, induites par les tassements du remblai et le chargement supplémentaire d'une part et la faiblesse du substratum d'autre part.

L'article fait le point sur les nombreuses campagnes de travaux dont a fait l'objet l'aménagement d'Etables depuis sa mise en service jusqu'à aujourd'hui, et plus particulièrement le renforcement de la fondation du barrage par injection et la réfection superficielle des piles par béton projeté (2005), le chemisage interne de la galerie d'amenée sur un linéaire de 40 m et la construction d'une fondation de type pile support de la galerie (2009) et la réfection des coursiers des passes vannées du barrage par un mortier hyper résistant et à haute résistance à l'abrasion (2011).

ABSTRACT

The city of Saint Claude strives to reinforce and cure Etables dam touched by the weaknesses of the concrete which it is made. Since its commissioning in 1932, the dam had several campaigns of work to strengthen the dam itself, its foundation and the headrace tunnel to the hydroelectric powerplant. The original concrete of the dam is very heterogeneous and generally of poor quality. In addition, the river contains high concentration of sand and gravel which erode the dam, especially the spillway's sluices. The headrace tunnel has longitudinal and cross cracks induced by the external and internal loadings, the poor concrete and a poor bedrock.

The article presents the many rehabilitations on Etables dam since its commissioning until today, and makes focus on the strengthening of the dam and its foundation (2005), the inner lining of the headrace tunnel over a length of 40 m (2009) and the rehabilitation of the spillway with a high resistance shotcrete (2011).

1. PRESENTATION DE L'AMENAGEMENT

1.1 Présentation générale

Le barrage d'Etables, dans le Jura, est un barrage poids en béton de 27 mètres de hauteur maximale sur fondation, construit entre 1930 et 1932. L'ouvrage est fondé sur du rocher calcaire et présente une forme circulaire en plan suivant un arc de cercle de 50 m de rayon. La longueur totale de l'ouvrage en crête est d'environ 70 mètres. L'épaisseur maximale au niveau du terrain naturel atteint 16,5 mètres pour une hauteur maximale au-dessus du talweg de l'ordre de 18 mètres ; c'est un ouvrage de classe B.

Le fond de vallée est fermé par un seuil à la cote 377,47 ; la crête du seuil atteint 6 m de large. La partie supérieure du barrage comprend trois pertuis de 8 mètres de large séparés par deux piles centrales de 6 mètres de largeur moyenne. Les trois passes d'évacuation sont équipées de vannes Stoney de 8 mètres par 8 mètres composées chacune d'une pelle inférieure de 6,70 m de hauteur et d'un volet déversant, en partie supérieure, de 1,30 m de hauteur.

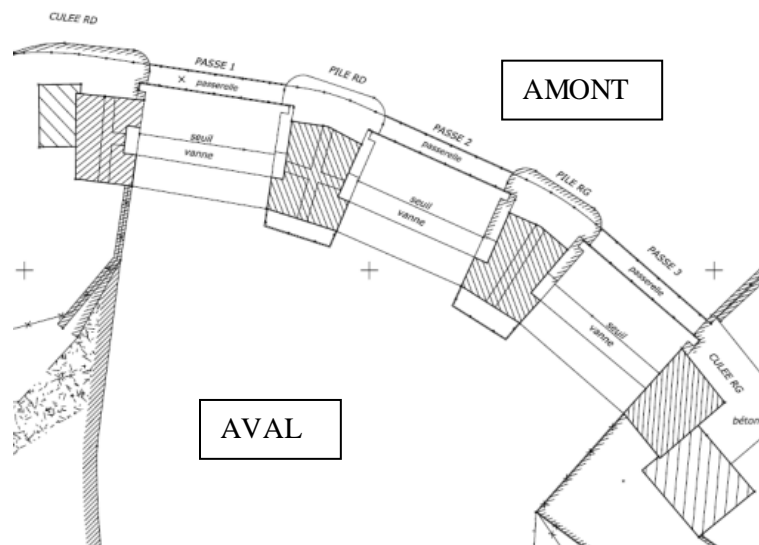


Figure 1 : Vue en plan du corps du barrage d'Etables

Les passes du barrage ont des géométries différentes :

- la passe de rive gauche (passe n°1) est constituée d'un seuil horizontal construit sur un affleurement rocheux,
- la passe de rive droite (passe n°3) est munie d'un petit coursier incliné terminé par une partie horizontale construite sur affleurement rocheux
- la passe centrale (passe n°2) est munie d'un coursier incliné quasi-vertical descendu jusqu'au pied aval de l'ouvrage constitué d'un radier béton qui se prolonge jusqu'en amont de la galerie de sortie de la restitution du débit réservé.

Au-dessus du couronnement du barrage, les piles et culées sont prolongées par des superstructures pour permettre le maintien des vannes en position levée et abriter, en leur partie haute, les organes de manœuvre des vannes.

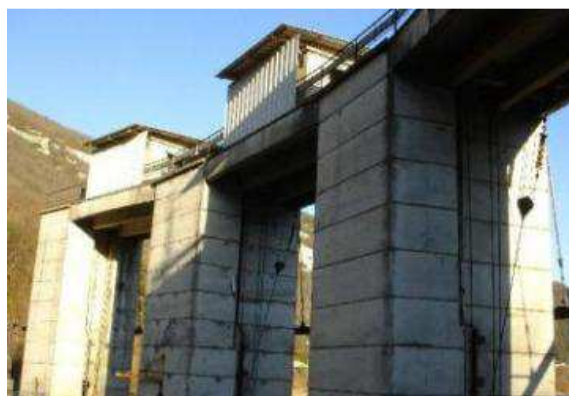


Photo 1 : Superstructures du barrage – Locaux abritant les organes de manœuvre des vannes

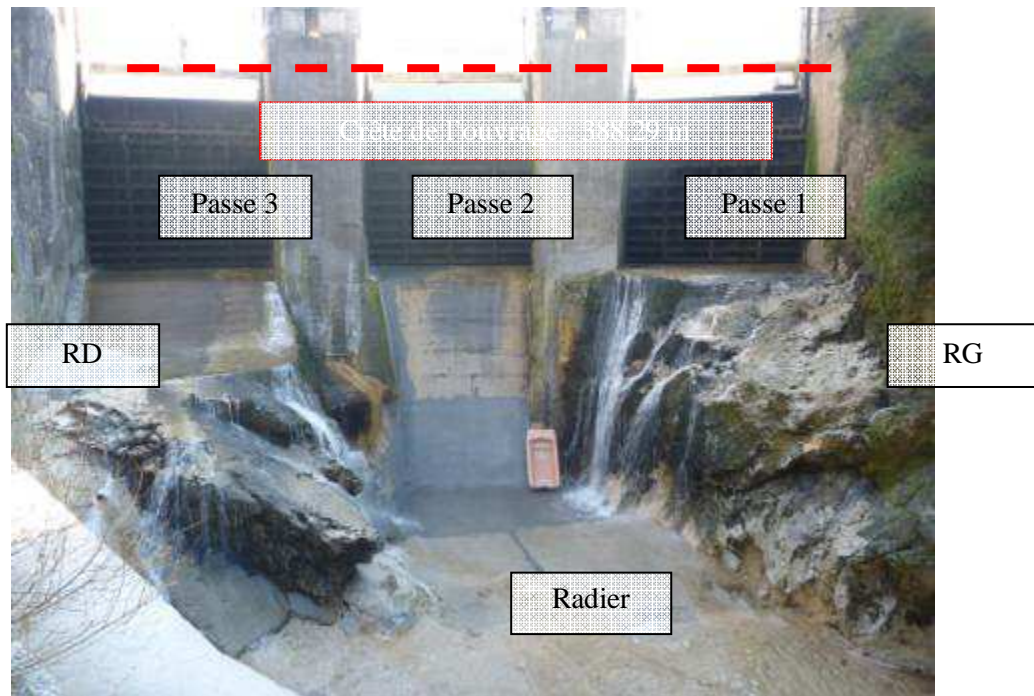


Photo2 : Vue du barrage depuis l'aval

Les volets de surface assurent progressivement la régulation du niveau de la retenue par leur inclinaison automatique pour les débits inférieurs à $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ($20 \text{ m}^3/\text{s}$ par volet). Pour des débits supérieurs la régulation du niveau du plan d'eau est assurée par les vannes Stoney, selon les consignes d'exploitation du barrage en crue.

Les volets déversants sont manœuvrés par un dispositif complexe constitué de moteur « Drouard » central raccordés à un flotteur par des câbles en acier fins et aux volets par des câbles en acier de plus gros diamètre.

Les vannes d'évacuation des crues du barrage sont manœuvrées automatiquement dans un ordre préétabli par des moteurs à courant alternatif. En cas de défaillance de l'alimentation principale en énergie, la reprise totale des auxiliaires du barrage est réalisée en automatique par un groupe électrogène. Un groupe de secours est disponible au local des vannes pour une alimentation en direct des moteurs des vannes d'évacuation des crues.

Dans le détail, l'ouverture autonome des vannes est contrôlée :

- soit par un flotteur, propre aux vannes Stoney, situé dans la pile de rive droite, qui régule le plan d'eau à la cote 385,47 (RN), en cas de capacité insuffisante des volets,
- soit via une sonde Rittmeyer, qui mesure un niveau d'eau, dont l'écart éventuel avec un intervalle de hauteur d'eau dans la retenue prédéfini commande l'ouverture ou la fermeture des vannes.

Le passage d'un mode de régulation à l'autre est effectué par un commutateur manuel situé dans le local d'exploitation du barrage.

1.2 Prises d'eau et vidange

La galerie de vidange de fond, issue du réaménagement de la galerie de dérivation, est située à proximité en rive gauche, à l'amont immédiat du barrage, et à l'extérieur de la chambre de prise d'eau.

La vanne de vidange, de type Stoney, dimensionnée pour évacuer un débit de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ sous la cote RN (dimensions : $1,90 \text{ m} \times 1,90 \text{ m}$), est actuellement inutilisable à cause de l'engrèvement de la retenue.

Les organes de prise d'eau (alimentation usine et débit réservé) sont installés au sein d'une chambre de prise d'eau équipée d'un seuil situé $2,42 \text{ m}$ au-dessus de la cote du seuil des vannes surmontée par une grille, de $20 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ (espacement de 25 mm). La grille est surmontée d'un dégrilleur fixe et d'un dégrilleur mobile.

Le débit réservé transite ensuite dans l'ancienne galerie de dérivation terminée par un seuil de contrôle de la valeur du débit réservé de $2,02 \text{ m}^3/\text{s}$.

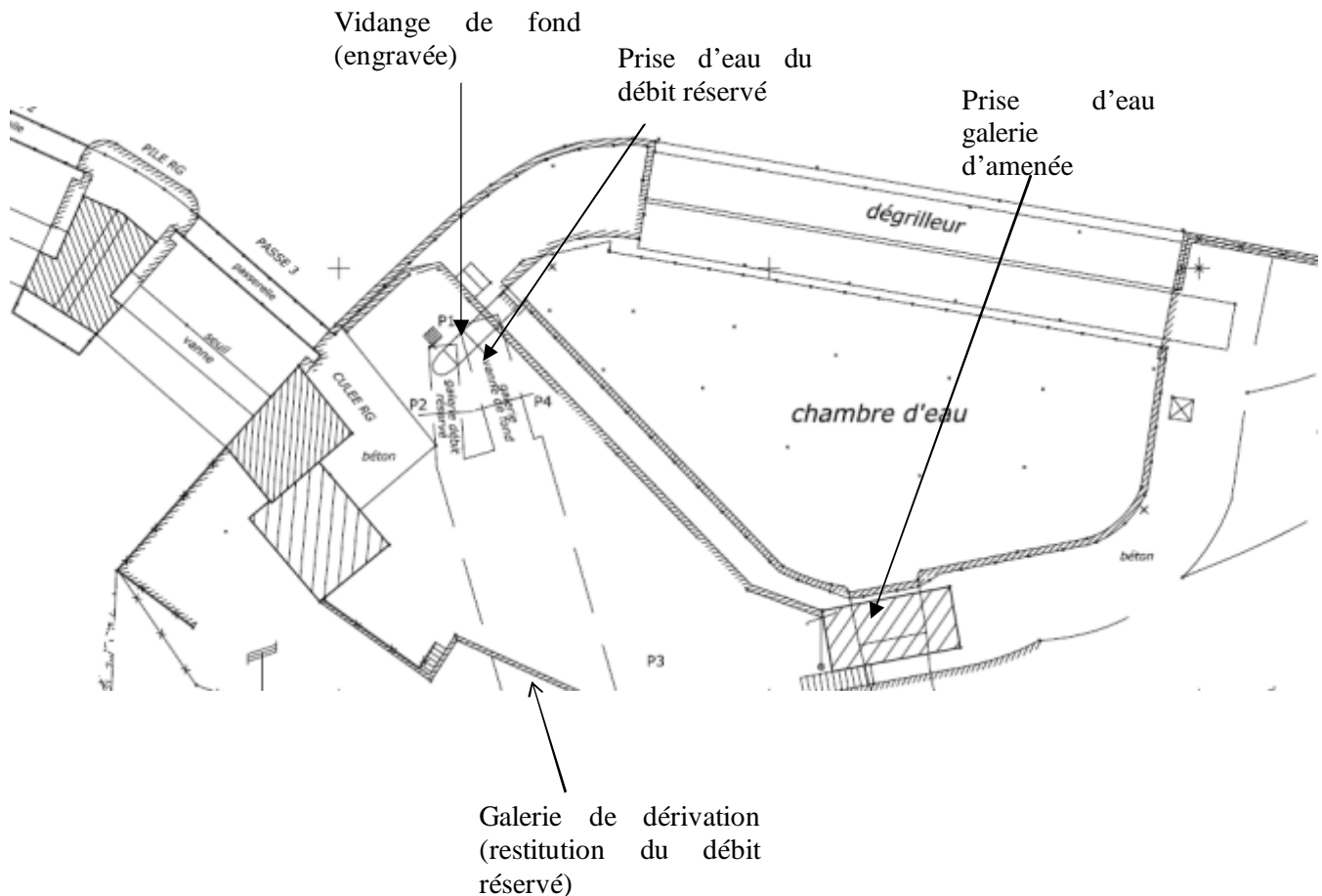


Figure 2 : Vue en plan des organes de prise d'eau (débit réservé et conduite d'amenée) et de vidange

1.3 Ouvrages d'amenée

La galerie d'amenée est entièrement souterraine. Elle a une longueur de 2146 mètres. La dérivation d'eau vers la centrale de Porte-Sachet par cette galerie court-circuite une longueur d'environ 4,5 km sur la Bienne. Le débit nominal d'alimentation des groupes hydroélectriques de Porte-Sachet est de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit turbiné maximal : $22 \text{ m}^3/\text{s}$).

La galerie d'amenée se divise en trois parties, deux parties excavées dans le rocher et une partie intermédiaire sous remblai :

- La partie « amont » d'environ 500 m de longueur sous faible couverture (jusqu'à 35 m),
- La partie « aval » d'environ 1500 m de longueur sous plus forte couverture (jusqu'à 175 m),
- La zone intermédiaire dite « découverte » de 183 m de longueur. Elle est précédée d'une petite cheminée de section carrée (trou d'homme) débouchant à l'air libre et visible de l'extérieur. La conduite est recouverte de remblai d'une épaisseur suffisante pour la recouvrir complètement, puis couverte par le remblai de la route située plus haut. Les documents de 1991 montrent que la route se trouve 6 à 8 m au-dessus de la galerie et que le remblai est constitué, dans la partie au-dessus de la galerie, par du « compostyrène ».

La section de la galerie est semi-circulaire de 3,30 m de diamètre à l'exception d'un tronçon d'une trentaine de mètres entre les PM 687 et 718 qui est circulaire. Cette zone correspond à l'entrée dans la partie souterraine « aval ».

La galerie se termine par une chambre d'équilibre circulaire, avec déversoir et coursier d'évacuation. Elle est équipée d'une vanne de tête de 3,4 m x 3,4 m de type Stoney avec vannette de remplissage et treuil à crémaillère à commande manuelle.

Puis, vient la conduite forcée, en partie dans le rocher, et passe sous la route nationale en amont immédiat de la centrale de Porte-Sachet. Elle a une longueur de 30 mètres et un diamètre de 2,80 mètres. A l'aval, elle est composée d'un collecteur comportant 4 distributeurs alimentant les turbines.

1.4 Dispositif d'auscultation

Le dispositif d'auscultation du barrage permet de surveiller principalement les conditions hydrauliques qui règnent dans la fondation de l'ouvrage. Il a fait l'objet de renforcements successifs :

- 5 drains en septembre 1999,
- 4 piézomètres auscultant le contact béton/rocher dans chacune des 4 piles/culées et 2 piézomètres dans l'appui rive droite en août 2002 à l'occasion des travaux de reconnaissance.

Il est aujourd'hui composé de :

- 28 drains :
 - o 18 drains dans le bajoyer RD de la passe vannée n°3,
 - o 4 dans l'éperon rocheux sous le coursier de la passe vannée n°1,
 - o 2 dans l'éperon rocheux sous le coursier de la passe vannée n°3,
 - o 4 au pied aval de la pile rive droite,
- 5 piézomètres dans les piles et culées du barrage,
- 2 piézomètres dans la rive droite.

Le dispositif est complété par un contrôleur de joint de type vinchon, qui mesure les mouvements de la fissure sur le mur amont de la culée rive droite.

2. SYNTHESE TECHNICO HISTORIQUE DU BARRAGE

Construit entre 1930 et 1932, et mis en service en 1932, le barrage d'Etables (Jura) a connu depuis de nombreuses campagnes de travaux régulières et étalées dans le temps jusqu'à aujourd'hui.

Selon le journal du chantier, le barrage aurait été fondé au rocher préalablement muni de redans parafouille. Pourtant, dès 1932, des résurgences en pression au pied aval du barrage étaient observées, en particulier côté rive droite, colmatées par la suite depuis l'amont.

En 1933, lors d'une visite particulière de l'Ingénieur Conseil de la Ville, ce dernier a émis plusieurs recommandations qui ont donné suite aux travaux suivants :

- Allongement du bajoyer RD de la passe n°3 afin de guider l'écoulement sur une plus grande distance et protéger de l'érosion le talus ferroviaire à l'aplomb du barrage en rive droite ;
- Epaissement du bajoyer RD et confortement du parement rocheux de la rive droite par des gabions ;
- Abattage d'un éperon rocheux entre la passe n°2 et la passe n°3 au pied aval du barrage ;
- Comblement de la fosse aval formée par un seuil naturel à 28 m du barrage et protection contre l'érosion par un revêtement en bois ;
- Réalisation d'un écran d'injection en amont de la culée RD pour limiter les contournements via la culée ou le rocher.

En outre, L'Ingénieur Conseil précisait dans son compte rendu que les bétons des superstructures présentaient les signes d'une infiltration des eaux pluviales.

Un rapport de crue daté du 17 octobre 1935, relatant l'évènement du 1er octobre, dresse les constats de désordres suivants :

- Emportement partiel du mur de soutènement RD, prolongé en 1933,
- Fosse d'érosion importante au pied aval du barrage, comblée et protégée en 1933.

Lors de sa visite du 8 mai 1942, à l'occasion d'une vidange de la retenue, l'Inspecteur Radigue du Service de contrôle des barrages dressait les constats suivants :

- Infiltrations depuis l'amont immédiat du barrage, en RG et en RD en moindre mesure (contournement sous les ouvrages de prise) dont les exhaures sont observés à 20/30 m à l'aval du barrage,
- Erosion superficielle du coursier de la passe centrale,
- Comblement progressif de la retenue nécessitant l'augmentation de la fréquence des chasses,
- Observations de nombreuses fissures longitudinales dans la galerie d'amenée, en voûte (aux reins) et en radier, nombreuses boursouflures de l'enduit et nombreuses cavités en radier.

En 1963, l'entrepreneur locale Baroni procède une première fois au remplissage des fosses d'érosion profondes au pied de la passe n°2 (11m x 7m de 0,9 à 2,5m d'épaisseur) et en moindre mesure sur la passe n°3.

En 1968, l'entreprise Baroni réalise la réfection du radier de la passe centrale par la mise en œuvre d'une poutre transversale en béton, armé en partie supérieure, et un regarnissage minimum de 25 cm du coursier. En parallèle, l'entreprise Baroni a réalisé le ragréage des pieds des bajoyers des passes du barrage.

En novembre 1969, le Laboratoire des Ponts et Chaussées d'Autun a effectué une campagne de reconnaissance des bétons du barrage d'Etables, constituée de 4 forages carottés. L'examen des carottes prélevées dans le béton du barrage montrait que le mortier était friable, peu adhérent aux granulats et humide.

Déjà, à cette époque il a été envisagé de constituer une carapace en béton autour des piles afin de les étancher.

C'est ainsi qu'il a été procédé dans un premier temps à la réfection de la culée RD en 1971 ; la réfection des autres piles étaient prévues en 1973. Les poutres horizontales de la superstructure, support des moteurs et organes de manœuvres des vannes, sont à cette époque en bon état.

Une nouvelle campagne de reconnaissance a été menée par l'entreprise Soletanche en 1971, consistant en la réalisation de 3 forages carottés descendus jusque dans la fondation rocheuse du barrage. Dans le corps de l'ouvrage, il a été observé une alternance de béton et de lits de graviers très perméables, et en fondation un calcaire blanc fissuré.

De la fluorescéine introduite en tête de forage ressortait au niveau du seuil des vannes Stoney du barrage.

Dans la continuité, en 1972, Soletanche a été missionnée pour réaliser des travaux d'injections en amont de l'ouvrage. Ces travaux consistaient à créer un voile étanche en amont de l'ouvrage par injection de ciment. Deux lignes de forages, la première à l'aval au ras des superstructures, la seconde à 0,6 m du parement amont, toutes deux injectées à retenue vide et descendues jusqu'à 10 m dans les piles et les deux culées en rive.

A l'issue des travaux, il a été foré une ligne intermédiaire de 12 forages supplémentaires, à retenue pleine, pour essais de perméabilités. Ces forages de contrôle ont montré que les injections ont été satisfaisantes dans la pile RD et la culée RD et qu'elles étaient à poursuivre dans la pile RG. Les forages de contrôle ont ensuite été injectés de 2/3 mètres dans le rocher de fondation jusqu'au niveau des PHE dans les piles, constituant en outre un collage béton / rocher. Au total, 112 m³ de coulis ont été injectés dans la culée RD, la pile RD la pile RG et la culée RG.

Toutefois, il est apparu que la pile de rive droite, haute de 26 m au-dessus des fondations, était fondée dans le lit de la Bienne, ce qui induit que la partie inférieure de la pile, sur ces 10 premiers mètres, n'a pas été traitée.

Il est à signaler que l'avis du Service des Ponts et Chaussées de Dijon émettait des réserves vis-à-vis des résultats des essais d'eau, contrairement à l'entreprise Soletanche.

A la suite de ces travaux, sous l'impulsion de l'entité de contrôle, un forage de 30 m dans la pile RD du barrage a été réalisé en août 1972. A mi-hauteur de la pile, d'importants débits transitaient au travers du béton montrant la présence de vides résiduels dans le béton.

Le 12 octobre 1973, à l'occasion d'une visite du Service de Contrôle, les fuites observées à travers le bajoyer de la RD (culée RD), à l'aval de la plateforme légèrement au dessus de la cote du seuil des vannes, étaient réapparues après avoir disparu après les injections de 1972.

En 1975, une nouvelle campagne de travaux a été effectuée au barrage d'Étables, nécessitant une vidange de la retenue. Il est à noter que la vidange a été obtenue par « chasse de fond » selon les documents d'archives, c'est-à-dire par l'ouverture de la vanne de vidange de fond, en contradiction avec le constat de son engrèvement fait en 1973.

Les opérations suivantes, conduites par l'entreprise Soletanche, ont été effectuées :

- Injections de 3 forages carottés de 10 m sur la culée RD et 1 carottage 28,8 m dans la pile RD ; le volume de coulis mis en œuvre est de l'ordre de 9 m³,
- Réfection de la pile RG et de la culée RD par ceinture de béton armé,
- Réfection des poutres horizontales des superstructures entre les piles n°1 et n°2,
- Réfection du local des flotteurs de commande des vannes et volets.

Du 11 décembre 1991 au 7 février 1992, une ligne de forages de 10 ml dans la pile RD, qui présentait de nombreuses venues d'eau à l'aval, a été réalisée puis injectée.

En parallèle, les travaux ont consisté à conforter les fondations du mur amont de la culée RD par le battage d'un rideau de palplanches et la mise en œuvre de béton. Ces travaux ont été réalisés par phases successives face à l'instabilité du mur de soutènement.

En 1993, les travaux suivants ont été réalisés :

- Forage et injections du pied aval de la pile 3 pour colmatage et régénération du béton (injections dans le béton et au contact béton/rocher) : injections dans la pile RD dans des forages de 4 m de longueur depuis les seuils des passes RD et centrale ;
- Reconstitution du réseau de drainage de la pile 3,
- Démolition (entre 15 et 35 cm) et confortement du pied aval de la pile 3 par un voile en béton armé,
- Reprise du pied du bajoyer de la pile RD depuis le seuil jusqu'au pied du barrage sur une épaisseur de 15 à 20 cm et ancrage au support,
- Reprofilage et confortement par du béton haute performance sur 1,5 m des faces latérales des bajoyers de la passe centrale (passe n°2),
- Reprise des enduits dégradés des faces inférieures des piles 2 et 3 (confortement du bajoyer RG de la pile 3).

Le compte rendu de travaux indique que le coulis mis en œuvre au contact béton/rocher est emporté par les drains de la passe 3, le béton et le rocher vers l'aval du barrage. Certaines passes de carottes présentent une absence quasi-totale de liant et/ou d'éléments fins. En particulier, il a été repéré une cavité de profondeur 0,5 m sur la face aval de la pile n°3. Enfin, les traces des injections de 1972 sont présentes sur les carottes prélevées.

Le rapport de fin de travaux conclut que les injections au contact béton/rocher au pied de pile n°3 furent un succès. Pour la première fois, l'entreprise en charge des travaux suspecte que le liant d'origine soit à base de chaux et non de ciment.

En 1994-1996, une première expertise de Coyne et Bellier inclut une étude sommaire de stabilité du barrage, portant sur un profil traditionnel de pile composée d'un béton de densité 2,4, qui conclut à une marge de sécurité suffisante vis à vis de la stabilité du barrage.

3. CONFORTEMENT DU BARRAGE D'ÉTABLES – 2000 - 2005

En 2001, Coyne et Bellier établit un nouveau programme de reconnaissances de la fondation et du béton du barrage d'Étables. Il comprend :

- 12 sondages carottés, 10 dans l'ouvrage et 2 dans l'appui RD ;
- 16 essais Lugeon et 6 essais au dilatomètre
- Une batterie d'essais de laboratoires : porosité ouverte, densité sèche et saturée, résistante à la compression, résistance à la traction par fendage, vitesse du son, nature et dosage du ciment, sensibilité à l'alcali réaction.

Les paragraphes qui suivent sont issus du document « Synthèse des reconnaissances complémentaires par sondages juillet-août 2002 » n° 10300 RP 09 de Coyne et Bellier.

« La fondation rocheuse est représentée par des calcaires massifs, généralement peu fissurés. En revanche, les carottes témoignent de la qualité médiocre du béton, très hétérogène et localement très poreux et fissuré.

La forme angulaire des agrégats utilisés pour la conception du béton, résultant du concassage du calcaire est moins favorable à la réalisation d'un béton de qualité que des agrégats roulés provenant des alluvions. La présence locale de blocs de calcaire de grande dimension a été mise en évidence par les forages (plus de 30 cm de longueur). Ces aspects défavorables de nature géométrique et granulométrique ont pu contribuer à l'évolution du processus de dégradation.

Des zones de béton sain alternent avec des zones de béton plus ou moins dégradé. Les zones de décomposition intenses du béton, rencontrées dans tous les sondages, ne possèdent aucune distribution spatiale particulière, sans corrélation apparente avec la profondeur ou avec certaines parties de l'ouvrage. Les taux de récupération dans ces zones varient de 39% à 80 %

Les taux de récupération les plus faibles indiquent l'existence de vides de grandes dimensions, dans la pile Rive Droite et dans la culée Rive Droite. Il est également à noter un taux de récupération extrêmement bas dans un des forages réalisé entièrement au contact béton / fondation rocheuse.

Le produit injecté lors de la campagne de 1971 est compact et dur ; en revanche il n'a pas rempli tous les vides qui restaient très nombreux.

Lors de l'exécution des forages, des venues et des pertes d'eau ont été enregistrées dans tous les sondages, témoignant de la perméabilité, parfois très élevée, du béton, confirmé par les essais Lugeon, « à pression réduite » compte tenu de la nature des matériaux environnants. Les essais confirment ceux de Soletanche de 1971 et soulignent l'efficacité partielle des injections de 1972 »

Les essais effectués sur des carottes indiquant une qualité de béton plutôt bonne donnent les résultats suivants :

- la courbe de chargement d'une éprouvette présente un indice de déformation plastique, i.e. l'accroissement de la déformation est plus rapide que celui de la pression appliquée et pourrait témoigner de la fracturation du béton.
- les valeurs de densité sèche sont comprises en 2,05 et 2,40 g/cm³ avec une moyenne de 2,26 g/cm³, sur des éléments sains en omettant les vides importants.
- les valeurs de porosité sont comprises entre 7,4 et 15,5 % avec une moyenne de 11,4 %, soit un indice de perméabilité élevée du béton.
- les valeurs de résistance à la compression et à la traction sont respectivement comprises dans les intervalles [8-27,5 MPa] et [1,8-4,2 MPa] et s'inscrivent dans des valeurs normales pour ce type d'ouvrage
- les essais dilatométriques réalisés selon la norme expérimentale XP P 94-443-1 ont montré que les modules de déformation était relativement bas, inférieurs à 15 MPa (fourchette normale 15-35 MPa)
- le dosage du ciment est très variable selon les échantillons, et globalement faible. Certaines éprouvettes contiennent des proportions de ciment inférieures à 75 kg /m³.
- L'analyse chimique du liant du béton n'a pas apporté d'élément significatif (le liant serait donc du ciment et non de la chaux, comme il a pu être avancé dans le passé),
- le béton ne présente aucun indice d'alcali-réaction.

Sur la base de ces résultats, une étude de stabilité a été menée sur la pile RD, celle de plus grande hauteur, jusqu'au niveau de la fondation. Compte tenu de leurs profils généreux, la stabilité des culées ne pose pas de problème et n'a pas été étudiée.

Les sondages effectués en 2002 ont montré que l'hypothèse de calcul de 1994 (densité du béton de 2,40) était très optimiste, les valeurs de densité sèche du béton variant entre 2,05 et 2,40. La moyenne de cet intervalle, 2,26, surestime encore la valeur moyenne de la densité du béton sur l'ensemble de l'ouvrage puisque les essais ont été réalisés sur des échantillons relativement homogènes vis-à-vis des zones les plus dégradées. Ainsi, les calculs réalisés tiennent compte d'une densité du béton de 2,15, et en outre, un angle de

frottement interne de 39° et une cohésion entre deux couches de béton et au contact béton/fondation de 0,1 MPa.

Après analyse des résultats de calculs, il est constaté la mise en traction du pied amont de la pile. Toutefois, la prise en compte de la butée et de la superstructure permet de limiter la longueur de section tendue au tiers de la section ; le pied de pile n'est pas sujet au glissement. Par contre, le risque de propagation de la pleine sous pression à l'intérieur de la pile persiste malgré la butée et la superstructure.

Cette analyse met en évidence le rôle stabilisateur des superstructures des piles et de la butée. Le risque de diffusion de la pleine sous-pression lié à l'existence de tractions dans le pied amont n'est pas écarté ; le barrage présentait donc à cette époque une marge de sécurité insuffisante nécessitant un renforcement du barrage, visant à barrer toute circulation d'eau à travers l'ouvrage.

Les travaux consécutifs aux désordres observés ont été réalisés en 2005 par la société COFEX. La solution mise en œuvre consistait à traiter par injection les parties amont des piles et des culées après avoir traité en surface leur parement (depuis le nez des piles jusqu'aux rainures des vannes) par la réalisation d'un voile superficiel en béton armé qui se substituera au béton existant. Dans le détail, il a été effectué :

- repiquage et démolition des bétons dégradés sur au moins 15 cm de profondeur des parties amont entre la cote des seuils et celle du couronnement ;
- ancrage et ferrailage : forage et scellement des cannes d'ancrage (armature HA) dans le béton existant pour effectuer la liaison du béton rapporté avec la masse ;
- Projection de béton à l'aide d'un béton haute performance, résistant aux chocs et à l'abrasion, et lissage des parties amont, assurant un bon état de surface, avec drainage derrière le masque amont au niveau des deux piles. Les eaux sont collectées par un réseau de demi-buses fixées au parement amont et noyées dans le masque, et évacuées par des forages traversant les piles et débouchant sur la face aval des structures.
- Injections des parties inférieures (passes et pile RD), avec injections en auréole pour la pile RD, à l'aide d'un coulis à base de micro-ciment et réalisation d'un réseau de drainage à l'aval des voiles d'injection.

Les injections ont été réalisées à partir des passes sur toute la hauteur du barrage jusqu'à la profondeur d'un mètre dans le rocher. La rive droite a fait l'objet d'injections importantes dans sa base, soit en prolongeant les injections de tête, soit en intervenant à partir des passes adjacentes.

L'analyse des mesures d'auscultation, notamment les mesures de débits et en moindre mesure la piézométrie, met nettement en évidence l'apport bénéfique des travaux de 2005 pour le barrage d'Etables. On constate l'annulation ou presque des débits de drainage implantés dans la zone injectée ainsi qu'une baisse des niveaux dans certains piézomètres forés dans la zone d'emprise des travaux.

Il a été considéré que les importants travaux réalisés apportaient une amélioration générale de 5 % de la densité soit 2,26. Compte tenu des hypothèses simplificatrices prises en compte dans les calculs, ce gain de densité engendre de meilleures conditions de stabilité du barrage et donne des résultats satisfaisants vis-à-vis des marges de sécurité requises.

Les travaux de réfection des avant-becs des piles du barrage donnent encore aujourd'hui satisfaction. Les surfaces des piles sont lisses et les profils des ouvrages intacts.

4. CONFORTEMENT DE LA GALERIE D'AMENEE – CAMPAGNE DE 2009

La galerie d'aménée aussi a nécessité des travaux de confortement. Dès 1949, des fissures ont été décelées et reprises dans la conduite d'aménée, dans sa partie découverte à l'époque, aujourd'hui remblayée. Les travaux ont consisté dans la construction de trois jaquettes extérieures (respectivement longues de 6 m, 2 m et 3 m) ancrés dans le béton de la fondation ou dans le rocher aux endroits où la conduite d'aménée est appuyée directement au rocher.

A l'occasion des travaux de 2005, réalisés grâce à la vidange du plan d'eau, une inspection détaillée du génie civil de la galerie d'amenée du barrage a été réalisée par Coyne et Bellier. Il a été observé les désordres suivants :

- d'une manière générale, sous l'enduit de surface, un béton de qualité très médiocre,
- des fissures longitudinales structurelles liées à la mauvaise qualité du béton et aux chargements qui lui sont appliqués,
- une fissure longitudinale en radier entre les PM 520 et 550, dans la partie « découverte » présentant un décrochement centimétrique ce qui traduit une rupture du revêtement en radier avec cisaillement des aciers.

Ces observations traduisent un risque de rupture à la mise en charge de la galerie. Des réparations immédiates de la galerie ont été recommandées, soit par création d'un nouveau tronçon de galerie, soit par renforcement de la galerie par cintrage externe, soit par un renforcement de la galerie par chemisage interne. La solution de confortement finalement retenue, après analyse technico-économique de Coyne et Bellier avec le Maître d'Ouvrage, a été celle par chemisage intérieur.



*Photo 3 : Travaux de réfection de la galerie d'amenée réalisés en 2009
Profil de la galerie en « fer à cheval »*

Ainsi, la solution de confortement consistait dans le chemisage en béton armé de l'intérieur de la galerie sur le tronçon endommagé, soit un linéaire de 40 m entre les PM 515 et 555. Ce chemisage possède une épaisseur de 20 cm avec un ferrailage prévu pour reprendre la poussée hydrostatique en traction exercée sur la galerie et le poids des remblais environnant.

Afin d'éviter la propagation de fissures et l'apparition de nouvelles - et en conséquence de nouveaux désordres dans la galerie - il était prévu de réaliser la consolidation du terrain par 5 auréoles d'injections autour de la portion endommagée de la galerie, espacées de 5 m l'une de l'autre.

Les reconnaissances géotechniques des terrains sous la galerie, effectuées au démarrage des travaux, ont montré que les terrains sous-jacents étaient constitués de sables dont la portance était insuffisante. De plus, la nature des terrains rencontrés (terrains meubles) s'est avérée être incompatible avec un traitement de consolidation par injections, ce qui a nécessité de revoir le projet initial de confortement de la galerie.

Un modèle numérique aux éléments finis du tronçon à conforter a été réalisé en y intégrant les conditions de sol réelles du site données par la campagne de reconnaissances. De longueur 5 m, entre deux auréoles d'injection, lors des études, le tronçon modélisé est allongé jusqu'à 40 m. Le tronçon de galerie modélisée repose à ses extrémités sur des appuis, constitués par le substratum, qui imposent la condition limite suivante : un déplacement nul vers le bas. Bien qu'elle soit faible, la portance du sol permet de réduire significativement la quantité d'acier à intégrer à la nouvelle structure par rapport à une configuration sans portance. Les contraintes engendrées dans la galerie confortée dans ces conditions sont fortes et sont localisées en radier au centre du tronçon modélisé et, en voûte et en piédroits aux extrémités. Le nombre et le diamètre des armatures à mettre en place dans la galerie pour reprendre les contraintes dans le béton sont largement supérieurs au ferrailage prévu initialement. Constructivement, les densités d'acier sont si importantes qu'elles ne permettent pas la mise en place correcte du béton par projection et le ratio aire béton/aire acier dans un anneau de 20 cm d'épaisseur est insuffisant.

Autrement dit, la quantité d'acier trouvée dans cette analyse est incompatible avec la réalisation de cette solution de chemisage interne dans la galerie.

Ainsi, des recherches d'une solution alternative de traitement des fondations adaptée aux conditions de site ont été lancées. Les objectifs de ces études étaient de minimiser les modifications à apporter au projet de confortement de la galerie et d'en conserver la base, à savoir le chemisage interne.

La solution adoptée a consisté à créer, sous le tronçon de galerie à conforter, un appui intermédiaire descendu jusqu'au substratum sain. Cette solution a été vérifiée par une nouvelle modélisation. Dans la galerie, des renforts de ferrailage par rapport au projet initial étaient certes à prévoir, mais de manière raisonnable.

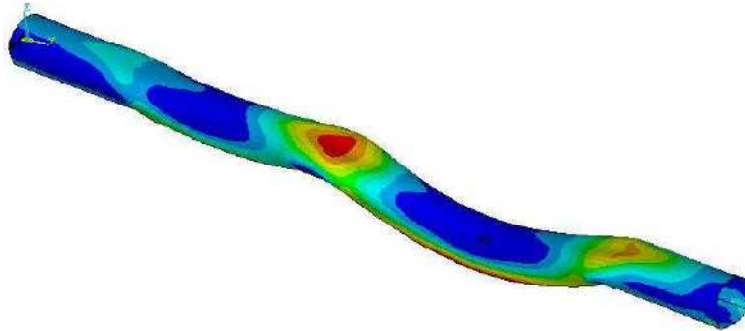


Figure 3 : Modèle numérique de la galerie – Ferrailage longitudinal à l'intrados

L'appui prévu est un puits en béton armé descendu jusqu'au rocher. Le puits est à créer depuis l'intérieur de la galerie, principalement manuellement étant donné l'étroitesse de la zone de travail, incompatible avec l'emprise de pelles mécaniques et autres gros engins de chantier. Sur proposition de l'Entreprise Freyssinet, en charge des travaux, les parois des fouilles à réaliser sont blindées à l'avancement par un revêtement en béton projeté dit à résistance initiale garantie (RIG) et un treillis soudés.

Le diamètre utile de la structure a été fixé à 1,80 m minimum sous réserve de la conformité avec les règlements du CCTG et du code du travail en matière de sécurité pour le personnel de l'entreprise.

La fondation du puits a été descendue 6 mètres sous le radier de la galerie, entièrement creusé à la main sans moyens mécanisés. La fouille réalisée a été remplie de béton jusqu'au niveau du fil d'eau de la galerie et ferrillée. Afin de résoudre les problèmes de poinçonnement du radier de la galerie, une dalle en béton armé de dimension 4 m x 2 m x 1 m a été créée au sommet du puits sous le radier du nouveau tronçon de galerie.

Les armatures mises en place dans le puits sont données par les prescriptions minimales de l'Eurocode 2, à savoir 64 cm² d'armatures longitudinales à répartir dans la section du puits et des armatures transversales HA6 espacés de 40 cm.

Le ferrailage mis en place dans la semelle anti-poinçonnement est constitué de deux nappes HA 16, intérieure et extérieure, avec un espacement de 10 cm dans les deux sens, longitudinal et transversal. Le tableau ci-dessous indique les quantités d'armatures mises en place uniformément dans la chemise, sous la forme de sections d'acier en centimètre carré par mètre linéaire.

			voûte	parement	radier
Section courante	face intérieure	transv.	12 cm ² /m	6,4 cm ² /m	6,4 cm ² /m
		long.	9,4 cm ² /m	8,4 cm ² /m	6,4 cm ² /m
	face extérieure	transv.	3,6 cm ² /m	15,7 cm ² /m	13,4 cm ² /m
		long.	7,5 cm ² /m	10,1 cm ² /m	13,4 cm ² /m

Tableau 1: Répartition des densités d'armatures dans la galerie

A l'encastrement radier/piédroit, zone particulièrement sollicitée, des chainages transversaux sont mis en place permettant également de s'affranchir du phénomène de poussée au vide. Les sections d'acier équivalentes complémentaires sont 11,3 cm² transversalement en faces extérieures et intérieures et 6,16 cm² longitudinalement.

D'autres renforts locaux, non significatifs et non précisés ici, ont également été mis en œuvre dans le chemisage.

La masse totale d'acier à incorporer à la nouvelle structure est évaluée à 18 tonnes environ, contre 13 tonnes dans le projet initial.

5. REFECTION DES COURSIERS DES PASSES DU BARRAGE – CAMPAGNE DE 2011

En 2011, suite au constat récurrent et de longue date de l'érosion significative des seuils et coursiers des passes du barrage, un reprofilage des surfaces a été réalisé par la société Freyssinet, sous Maîtrise d'œuvre Coyne et Bellier, au moyen d'un mortier projeté hyper-résistant sur une sous couche projetée de béton C35/45, le tout scellé à l'existant préalablement repiqué et purgé de ses éléments non ou faiblement adhérents.

En parallèle, les fosses d'érosion observées dans le radier ont été comblées au béton et il a été réalisé la réfection des exutoires des drains du mur de soutènement en rive droite à l'aval immédiat du barrage.

6. TRAVAUX ET ETUDES EN COURS

6.1 Réfection des superstructures du barrage

En 2011, la Ville de Saint Claude a démarré les études de réfection du génie civil de la sous face des superstructures. Les travaux sont en cours de réalisation.

Les conditions de réalisation de ces travaux de maçonnerie étant délicates, du fait des difficultés d'accès à la zone de travail qui se situe à l'aplomb de la rivière, le concessionnaire a opté pour la mise en place d'une plateforme à ossature métallique située à 2 mètres sous les poutres de la superstructure au droit de chacune des passes du barrage. Ces infrastructures devant permettre :

- la réalisation des travaux de maçonnerie en toute sécurité pour les intervenants,
- la récupération de l'ensemble des « déchets » de projection du béton afin de n'avoir aucun impact sur la rivière.

Postérieurement au chantier, ces plateformes permettront :

- une inspection facilitée des poulies et des câbles de manœuvre des vannes et des volets du barrage,
- une inspection facilitée de la sous face des superstructures.

La corrosion des aciers apparents étant superficielle, ils n'auront subi qu'une passivation. Au total, ce sont près de 6 m³ de mortier fibré à haute performance et à retrait compensé qui auront été appliqués.

Ces travaux n'auront en revanche traités que les conséquences de la perméabilité de la dalle supérieure du barrage, c'est pourquoi la Commune de Saint Claude a d'ores et déjà la volonté, à court terme (lancement des études en 2014), de couvrir ces superstructures par le biais de la création d'un bâtiment à ossature métallique.

6.2 Rénovation des vannes et volets du barrage

En 2012, la Ville de Saint Claude a sélectionné un bureau d'études pour mener les études de rénovation des vannes et volets du barrage et la fiabilisation des organes de manœuvres des volets. Les travaux, échelonnés sur 3 années, une par vanne, sont programmés entre 2014 et 2016.

En ce qui concerne la modification du système de commande des volets, elle sera traitée en priorité en 2014 afin de permettre les études de couverture des superstructures.

6.3 Turbinage du débit réservé

Enfin, les études détaillées de conception des ouvrages et équipements pour le turbinage du débit réservé du barrage d'Etables sont en cours par Coyne et Bellier.

Les ouvrages projetés sont constitués d'un puits d'accès, de hauteur 20 m et de diamètre 3 m environ, à creuser à 30 m du barrage, du réalésage de l'ancienne galerie de dérivation reconfigurée après la construction en galerie de vidange de fond et d'acheminement du débit réservé, des équipements hydro-électromécaniques dimensionnés pour une hauteur de chute brute de 17 m et un débit de 2,02 m³/s.

7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Journal du chantier, 1930 à 1932
- [2] SGE (mai-juin 1942), Chute d'Etables, rapport de visite des ouvrages de génie civil,
- [3] Maurice Mandrillon (1970). Rapport sur l'état et la réfection des piles, , Ingénieur – Conseil « Le Mont-Blanc » 01, Ferney, Voltaire,
- [4] SOLETANCHE (octobre 1971). Barrage d'Etables, Reconnaissance dans le béton de l'ouvrage, Compte rendu des travaux,
- [5] SOLETANCHE (septembre 1972). Barrage d'Etables, Régénération du béton de l'ouvrage par injection de ciment, Compte-rendu des travaux,
- [6] Ville de Saint Claude (1992). Reconstruction des fondations du mur rive droite du barrage d'Etables,
- [7] EDF (octobre 1993). Rapport de chantier des travaux de génie civil réalisés sur le barrage d'Etables en 1993,
- [8] COYNE et BELLIER (décembre 2002). Barrage d'Etables : Synthèse des reconnaissances complémentaires par sondages, Rapport : 10300 RP 09,
- [9] COYNE et BELLIER (novembre 2003). Barrage d'Etables, Etude de faisabilité des travaux de confortement du barrage, Rapport : 10300 RP 10 rév.B,
- [10] COYNE et BELLIER (octobre 2005). Galerie d'amenée du barrage d'Etables – Compte-rendu de la mission d'expertise du 7 octobre 2005, Rapport : 10300 RP 15,
- [11] COYNE et BELLIER (janvier 2009). Projet des travaux de confortement de la galerie d'amenée du barrage d'Etables, Rapport : 10300 RP 20 rév.B,
- [12] COYNE ET BELLIER (septembre 2009). Travaux de confortement de la galerie d'amenée du Barrage d'Etables - Modifications du projet de confortement suite aux résultats des reconnaissances géotechniques du terrain d'assise de la galerie, Rapport : 10300 RP 23,
- [13] COYNE et BELLIER (octobre 2010). Barrage d'Etables, Réfection des seuils et des coursiers aval des passes du barrage - cahier des clauses techniques particulières, Rapport : P.000994.0001 RP 01