

## **Réhabilitation du barrage de Sainte-Engrâce et création d'une nouvelle prise d'eau dans le barrage (Pyrénées atlantiques – France)**

### *Rehabilitation of Sainte-Engrâce dam, and creation of a new water intake in the dam*

Sébastien, Longares  
1 rue Louise Renault BP 13383 – 31133 Balma Cedex - FRANCE  
Tél. : +33 5 61 17 15 13, Fax : +33 5 61 17 60 51, sebastien.longares@shem.fr

Elisabel, E., Ureña  
Héliopôle Bât G – 33 – Av. Georges Pompidou BP 33175 – 33131 Balma Cedex - FRANCE  
Tél.: +33 5 61 24 80 23, elisabel.urena@gdfsuez.com

### **MOTS CLÉS**

Barrage, diagnostic, reconnaissances, gonflement béton, maçonnerie, stabilité, étanchéité, réhabilitation, confortement, percement, injections.

### **RÉSUMÉ**

*Réhabilitation du barrage de Sainte-Engrâce et création d'une nouvelle prise d'eau dans le barrage (Pyrénées Atlantiques). Barrage de classe A.*

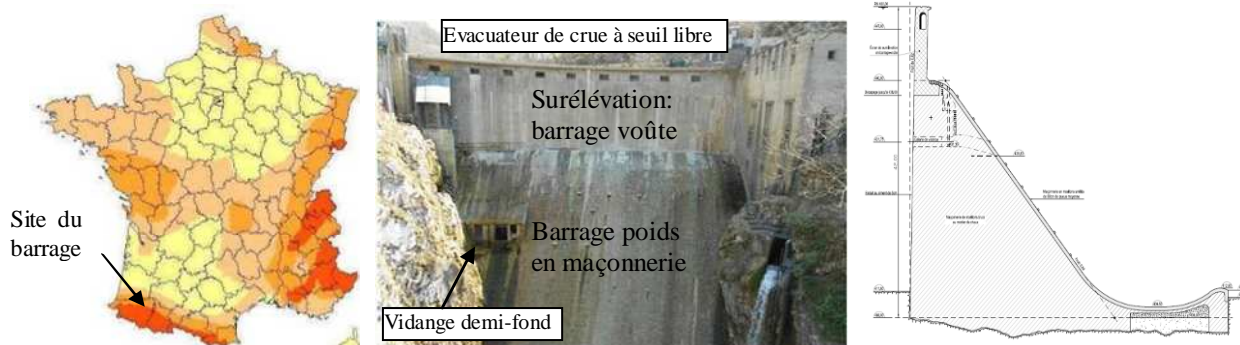
*La SHEM est concessionnaire de l'Etat pour l'exploitation du barrage de Sainte-Engrâce, situé dans les Pyrénées Atlantiques en France. Il s'agit d'un barrage poids en maçonnerie construit en 1916 et surélevé par une voûte en béton à crête déversante en 1953, créant une retenue de 535 000m<sup>3</sup>. Entre 2010 et 2012 l'ouvrage a fait l'objet d'un diagnostic sur l'état des matériaux constitutifs des ouvrages, de travaux de réhabilitation de la maçonnerie du barrage poids, et de travaux de percement de la voûte pour la création d'une nouvelle prise d'eau de turbinage du débit réservé. Le diagnostic de l'état des matériaux constitutifs des ouvrages (maçonnerie et béton), a consisté en une recherche du phénomène de gonflement sur des échantillons de béton de la voûte, et sur des carottes de reconnaissance extraites de la maçonnerie du barrage poids. Les travaux de réhabilitation de la maçonnerie du barrage poids ont consisté en une campagne d'injection de régénération de l'étanchéité de la maçonnerie sur toute la longueur du barrage à la suite d'une campagne de sondages de reconnaissance. Ces injections ont été prolongées jusqu'à l'appui rive droite du barrage. Le diagnostic, les reconnaissances et les injections s'inscrivent dans l'amélioration de l'état de sûreté de l'ouvrage ainsi que dans la connaissance des matériaux qui le constituent. Les travaux de percement de la voûte pour la création d'une nouvelle prise d'eau, réalisés en partie basse de la surélévation côté rive droite, sous un diamètre Ø800mm ont permis le scellement de la conduite de la prise d'eau.*

### **ABSTRACT**

*The SHEM is a hydroelectric concessionary of the State for Sainte-Engrâce Dam, located in the French Atlantic Pyrenees. Class A Dam. This gravity masonry dam was built in 1916 and heightened in 1953 by an arch concrete dam with a crest surface spillway, creating a reservoir of 535 000 m<sup>3</sup>. Between 2010 and 2012, the dam was the object of a diagnostic of its constitutive materials condition, rehabilitation works of the gravity masonry dam, and the drilling of the arch concrete dam to make a new water intake for turbinizing the environmental river flow. The diagnostic of the constitutive materials condition consisted in a research of expansive chemical reaction in some core samples of the concrete arch dam, and masonry investigations of the gravity masonry dam. The rehabilitation works of the gravity masonry dam consisted in a grouting to regenerate the masonry water tightness on the whole length of the dam, this was executed after the masonry investigations. The grouting was extended to the right riverbank of the dam. The diagnostic, the investigations and the grouting were done regarding on the security enhancement of the dam, and the knowledge of its constitutive materials. The drilling of the arch concrete dam for a new water intake, were made in the lower height of the structure right side, with an Ø800 mm drilling diameter embedding the intake pipe.*

## 1. INTRODUCTION

Le barrage de Sainte-Engrâce forme une retenue de 535 000 m<sup>3</sup> alimentée par le gave du même nom. Il fait partie des aménagements hydroélectriques exploités par la SHEM dans les Pyrénées Atlantiques. L'ouvrage est constitué d'un barrage poids en maçonnerie construit en 1916, surélevé par un barrage voûte à crête déversante en 1953. L'ouvrage fait une hauteur totale de 42 m sur fondation (32 m pour le barrage poids et 10 m pour le barrage voûte), et une longueur en crête de 49 m dont 35 m de crête déversante. Le barrage poids est constitué d'une maçonnerie de blocs hourdés au mortier de chaux, protégés par des moellons sur les parements. La surélévation est une voûte mince avec une galerie de passage sous la crête déversante qui chemine entre les deux rives. Une vanne de demi-fond en rive droite du barrage poids assure la vidange de la retenue. Le dispositif d'auscultation, avant 2012, était constitué d'un pendule inversé, d'un piézomètre et d'un point de fuite dans l'appui rive droite de la voûte, et un point de suivi topographique (planimétrie/altimétrie) en partie centrale sur la crête déversante. La retenue de Sainte-Engrâce alimente trois centrales hydroélectriques : Licq-Athérey (~6 km à l'aval du barrage), Sainte-Engrâce (en rive gauche du barrage), les deux avec prise d'eau en rive gauche du barrage, et la nouvelle centrale Sainte-Engrâce II (en pied aval rive droite du barrage) avec prise d'eau traversant la voûte en rive droite.



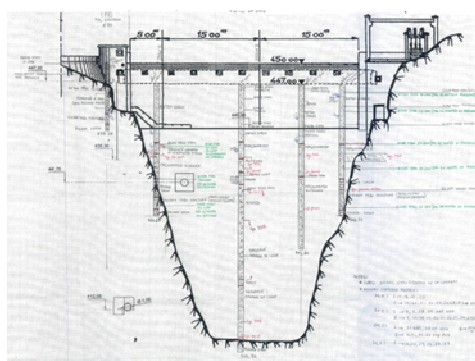
## 2. DIAGNOSTIC DE L'ETAT DES MATERIAUX CONSTITUTIFS DE L'OUVRAGE

En 2010, un diagnostic sur l'état des matériaux constitutifs de l'ouvrage a été réalisé : des recherches du phénomène de gonflement dans le béton du barrage voûte, et des carottages de reconnaissance dans la maçonnerie du barrage poids. Ces investigations ont été réalisées, pour le barrage poids, suite à l'observation de fuites sur le parement aval du barrage (plus le fait que l'ouvrage n'est pas drainé) ; et pour le barrage voûte, suite à l'observation des faibles mouvements irréversibles vers l'amont à travers les mesures de nivellement

### 2.1 Forages

5 forages verticaux carottés en Ø86mm ont été effectués depuis le radier de la galerie de passage :

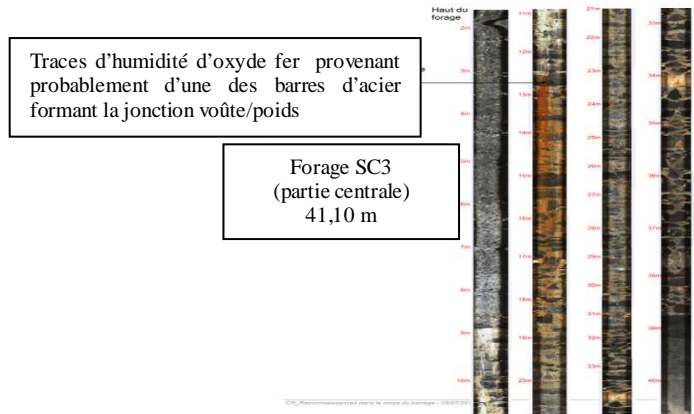
Appui rive droite (extérieur barrage)	Corps du barrage sur toute la longueur			
SC1	SC2 (RD)	SC3 (Centre)	SC4 (RG)	SC5 (RG)
10,75m	20,40m	41,10m	25,40m	20,10m



Lors des forages certains aspects sont intéressants à souligner :

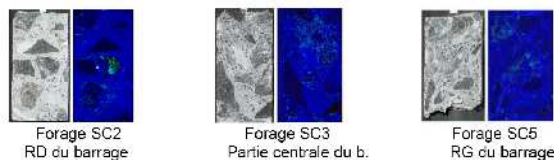
- Venues d'eau dans la niche du pendule lors du forage de SC1. Une protection a été créée autour du tubage du pendule, permettant de drainer ces venues d'eau par la galerie de passage.
- Forage SC5 artésien lors de déversements. Des obturateurs mécaniques ont été mis en place en tête du reste des forages.

Un contrôle de verticalité et une imagerie de paroi ont été réalisés sur les forages SC2, SC3 et SC5. Le contrôle de verticalité a donné des résultats satisfaisants. L'imagerie de paroi a permis d'observer le bon état du béton de la voûte, des traces ponctuelles d'humidité, la configuration du béton cyclopéen de la maçonnerie.



## 2.2 Recherche du phénomène de gonflement dans le béton de la voûte

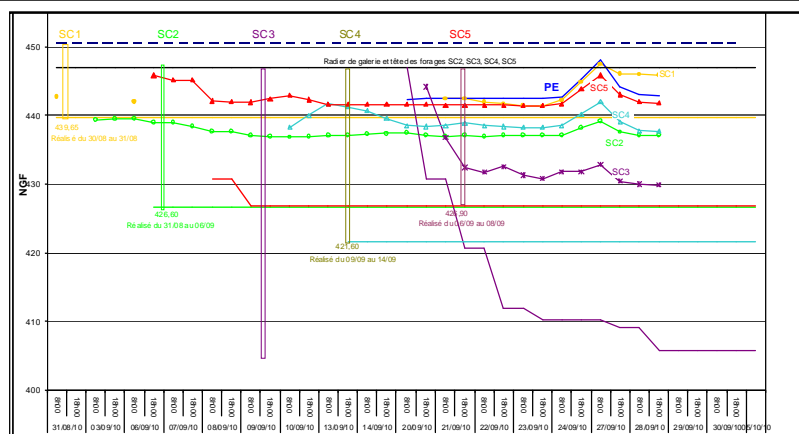
Les carottes extraites du béton de la voûte ont mis en évidence un béton sain. Des recherches d'alcali-réaction et de réaction sulfatique interne ont été réalisées sur ces échantillons dont une détection des produits d'alcali-réaction par la méthode LPC36 fluorescence des ions d'uranyle, et un examen au MEB (Microscope Electronique à Balayage). Les résultats ont montré une faible présence d'alcali-réaction, sans présence d'éléments pathogènes au MEB, concluant à l'absence du phénomène de gonflement dans le béton de la voûte.



## 2.3 Carottages de reconnaissances dans la maçonnerie du barrage poids

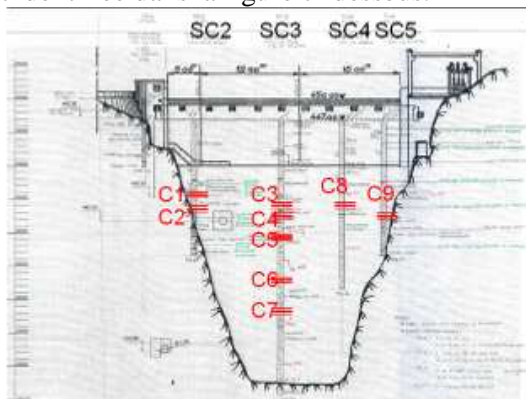
Les carottes extraites de la maçonnerie du barrage poids ont mis en évidence un béton cyclopéen avec des agrégats de gros calibre dans certains endroits, témoignant d'une maçonnerie dégradée, fissurée et très perméable ; avec des pertes d'eau à l'aval du barrage, identifiées par la présence de zones humides sur le parement aval, lors de la réalisation des forages. Le pourcentage de récupération des carottes était en général de 85%.

Le suivi journalier des niveaux statiques des forages pendant les travaux a mis en évidence l'influence de la retenue, amenant à l'installation des obturateurs mécaniques en tête des forages, évitant une éventuelle inondation de la galerie lors de déversements (comme c'était le cas pour le forage SC5 qui devenait artésien lors de déversements).



Des essais d'eau Lugeon n'ont pas pu être réalisés à cause de la forte perméabilité de la maçonnerie du barrage poids.

Des essais mécaniques à la traction ont été réalisés sur certains échantillons de la maçonnerie avant les injections dont la provenance est identifiée dans la figure ci-dessous.



Les essais de traction ont démontré que la présence de gros agrégats favorisait les lignes de rupture dans les interfaces cailloux/ciment ou à l'intérieur du caillou ; la moyenne de résistances mesurées a été bien représentative (1,8MPa), équivalent à celle de l'échantillon C3 qui était l'échantillon du fendage le plus correcte observé (où la rupture a bien traversé diamétralement la carotte sans passer par un agrégat ni sur le parement aval une interface agrégat/matrice). La valeur moyenne observée reste cohérente avec les valeurs de tractions maximales prises en compte dans l'étude de stabilité de 2002 (tractions faibles de 0.3MPa et tractions amont au sommet de la partie poids de 1,6MPa).

Suite à ces constatations, une opération de confortement du barrage poids par des injections a été réalisée entre 2011 et 2012 avec pour objectif d'améliorer la perméabilité du corps du barrage en créant un voile continu.

### 3. TRAVAUX D'INJECTION

#### 3.1 Contexte géologique

La vallée de Sainte-Engrâce, à proximité du barrage, présente la forme de gorges. Dans la zone d'implantation du barrage, la brèche présente des berges très abruptes et rocheuses. Sur les rives, la pente est régulière et pratiquement verticale. Le bassin versant est constitué pour l'essentiel par des formations calcaires très fortement karstifiées. La fondation du barrage est constituée :

- en rive droite : par des calcaire du Crétacé supérieur particulièrement résistants dans la partie inférieure ; dans la partie supérieure ces calcaires sont surmontés par des calcaires du Trias d'origine tectonique. Le contact avec les calcaires du Crétacé et le Trias présente la particularité de comporter d'importantes cavités karstiques.

- en rive gauche : les calcaires sont surmontés par des flyschs (formation sédimentaire caractérisée par des rapides variations de faciès) schisto-gréseux de la fin du Crétacé.

Sur la rive droite, au niveau de la route départementale, une faille à déjà fait l'objet d'injections en 1953 (lors de la surélévation du barrage) et également en 1992.

### 3.2 Injections de régénération de la maçonnerie du barrage poids

Les travaux d'injection dans le barrage ont été réalisés afin d'améliorer l'étanchéité de la maçonnerie du barrage poids sur l'amont de l'ouvrage.

#### 3.2.1 Forages et mesures de protection

Une seule ligne de forages a été réalisée depuis la galerie de passage, constituée de sept forages primaires (FP) et de sept forages secondaires (FS) intercalés entre les premiers. L'écartement moyen entre forages était de 2,50m. Les forages ont été réalisés en destructif, à l'air et au marteau fond de trou 3" (Ø90), allant jusqu'au rocher de fondation (Beretta T43 avec glissière désaccouplée). Plusieurs incidents sont survenus lors des forages : des outils bloqués (présences de corps métalliques) et des communications avec la retenue. Trois contrôles de verticalité ont été réalisés, dont deux au droit des forages à proximité de l'abri de la vanne de vidange, et au droit du forage le plus profond.

Mesures de protection mises en place pendant les forages et les injections :

- obturation des têtes de forage et des barbacanes de drainage de la galerie de passage, protection des câbles de communication vers la centrale en rive gauche du barrage, batardage des extrémités de la galerie de passage, protection du pendule existant en rive droite et centrale hydraulique de commande de la vanne de vidange.
- résidus de forages et effluents des injections collectés dans une benne à l'extérieur du barrage sur la rive droite, à l'aide d'une pompe de refoulement.
- système d'alarme de déversement (poire et klaxon), testé tous les jours pendant les travaux.
- suivi de l'abri de la vanne de vidange
- contrôle de l'absence de résurgence de coulis à l'amont du barrage
- personnels cordistes en charge du suivi et du colmatage des éventuelles résurgences sur le parement aval.

#### 3.2.2 Essais de convenance de coulis

Des essais de convenance de coulis ont été réalisés avant les injections, réalisés en partant de dosages en ciment très faibles jusqu'à des épaissements du coulis avec ajout de Béatite (poudre de marbre). Cinq types de coulis ont été définis :

Composition	Unité	A	B	C	D	E
Ciment DURABAT CEM III/C	Kg	70	70	70	70	70
Eau	Litres	90	90	80	80	80
Filler Béatite 12	Kg	0	25	50	50	50
Bentonite CV15	Kg	0	0	0	1	2
Fluidifiant	Litres	0	0	0	0	0
Dosage	C/E	0,78	1,05	1,5	1,51	1,525

#### 3.2.3 Matériel d'injection

L'atelier d'injection était constitué d'un bac de malaxage à hautes turbulences, de 200 litres de capacité, un bac de reprise avec agitateur de 500 litres, et une presse d'injection de type DOMMINE PH2x5. Un enregistreur de paramètres LUTZ BAP MC 160 avec courbes pression/volume dont les capteurs de pression étaient installés en tête des forages a permis l'asservissement de la presse à injection. Le transfert de coulis jusqu'au droit de chaque forage était réalisé par des conduites à haute pression en Ø 3/4". L'ensemble des eaux de lavage était pompé et mis à décanter dans une benne étanche, avant évacuation de l'eau propre à l'aval du barrage. Les groupes de puissance utilisant de l'huile ou du gasoil étaient protégés par des bacs de rétention.

#### 3.2.4 Injections

Les injections ont été réalisées à l'avancement du haut vers le bas, par passes d'injection successives tous les 5 m et après reforage. Les chambres d'injection ont été fermées, en partie haute et basse, par la mise en place d'obturateurs. Les pressions d'injection ont été limitées à 5 bars en tête de chambre pour un volume consécutif maximum de 1m<sup>3</sup>/ml de forage. Le critère de volume n'ayant jamais été atteint. Des opérateurs cordistes étaient positionnés sur le parement aval et identifiaient les résurgences de coulis et les colmataient. La partie voûte a été traitée sur une passe de 10m ; seul le contact voûte/barrage poids étant absorbant. Les cinq forages de reconnaissance réalisés en 2010 ont servi de points d'observation pour les forages injectés

situés à proximité et ont permis de confirmer les circulations de coulis ; les forages de reconnaissance ont été injectés après l'injection de forages secondaires. Les dosages C/E ont été modifiés sur place selon les conditions rencontrés dans chaque forage

- 1) C/E = 0,8 (coulis de type A)
- 2) C/E = 0,8 + fluidifiant
- 3) C/E = 1 + fluidifiant
- 4) C/E = 1,52 + fluidifiant
- 5) C/E = 2
- 6) Betec<sup>5</sup> : utilisé pour des forages en communication avec l'aval.

Le volume total injecté était de 40,035 m<sup>3</sup> réparti entre les forages primaires et secondaires comme suit :

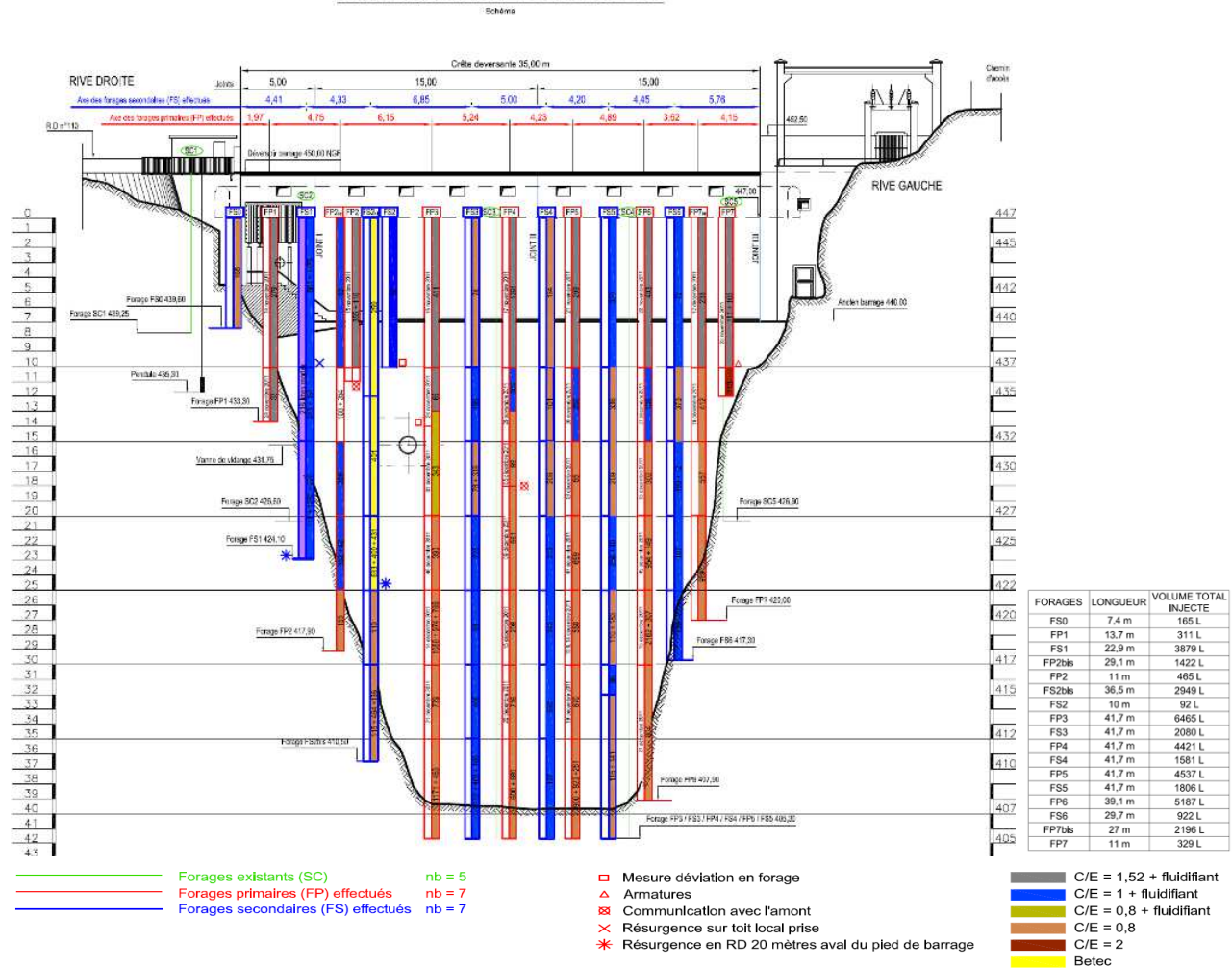
Forages	Volume injecté	Absorption maxi
Primaires	25,975 m <sup>3</sup>	400 litres/ml → FP6 dans la passe de 25 à 30 m
Secondaires	14,060 m <sup>3</sup>	176 litres/ml → FS5 dans la passe de 31,5 à 35 m

Forage injecté au mortier : 218 litres (0,218 m<sup>3</sup>) → FS1 dans la passe de 15 à 23 m, confirmant selon les conditions rencontrées la **qualité de la culée RD du barrage**

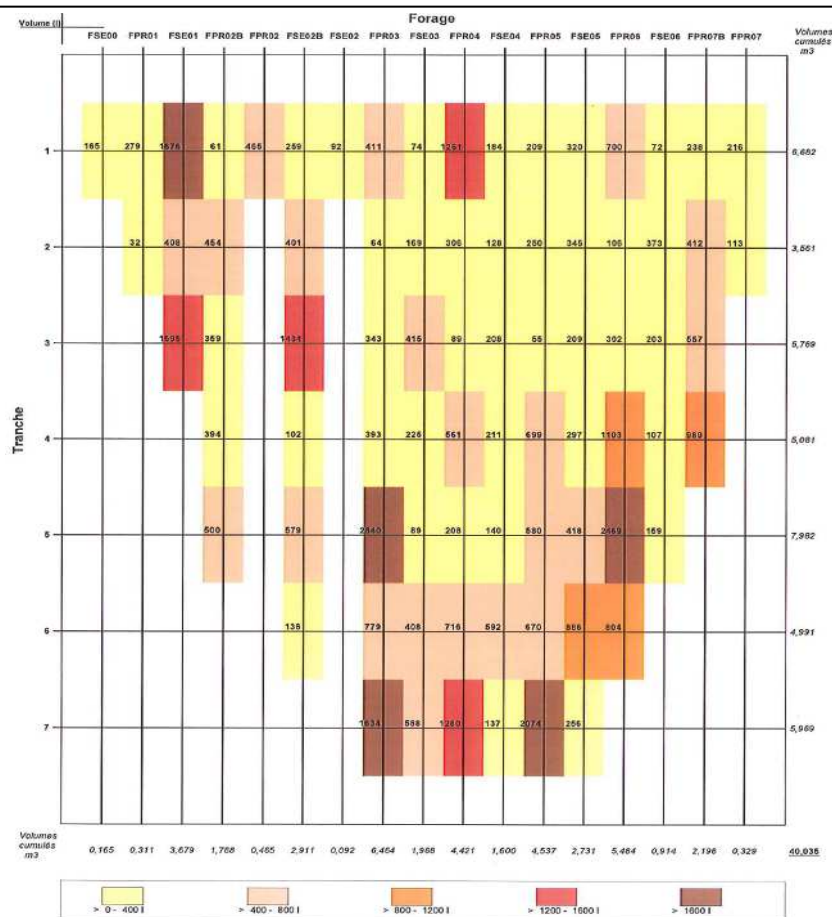
Forage injecté au Betec : 2 124 litres (2,124 m<sup>3</sup>) → FS2bis dans la passe de 0 à 25 m.

La synthèse de volumes injectés et des observations lors des injections sont présentées ci-après :

**ÉLEVATION AVAL DÉVELOPPÉE**



<sup>5</sup> Betec : Ciment de scellement superfine, utilisé dans les injections/remplissage de fissures, et dans la reconstruction du béton cavernueux poreux.



Observations particulières pendant les injections :

- l'ensemble des forages de reconnaissance a été le siège de communications avec les forages injectés à proximité : ils ont été lavés à plusieurs reprises ;
- venues d'eau perturbant le durcissement du coulis d'injection ;
- quelques résurgences sur le parement aval du barrage poids ;
- quelques résurgences au niveau du rocher de l'appui sur la même rive du forage et sur le rocher de la rive opposé (FS1 où l'injection du forage a été finie au mortier, FS2 où la passe a été injectée au Betec).

### 3.3 Injections de l'appui rive droite du barrage

Les travaux d'injection de l'appui ont été réalisés afin de compléter le rideau d'étanchéité existant réalisé en 1992. Ces travaux ont été envisagés suite à la crue survenue sur le site du barrage en novembre 2011 (débit déversé par l'évacuateur de crue d'environ 160 m<sup>3</sup>/s). Cette crue s'était accompagnée de résurgences sur la plateforme du chantier d'une nouvelle prise d'eau en cours de réalisation en rive droite du barrage, et mettant en évidence des circulations d'eau dans l'appui rive droite. Il a donc été décidé de prolonger le voile d'injection en cours dans le corps du barrage vers la rive droite. Les coupes de forages étaient similaires sur l'ensemble de la zone avec en partie supérieure la partie appelée remblai de route sur une épaisseur d'un mètre cinquante avec des matériaux rapportés, une couche sur une épaisseur de six à sept mètres d'épaisseur de calcaire du Trias et en partie inférieure un calcaire du Crétacé supérieur (calcaire des canyons)

#### 3.3.1 Forages et mesures de protection

Quatre lignes de forages ont été réalisées depuis la chaussée de la route départementale RD113, depuis l'appui rive droite du barrage jusqu'au rocher de l'autre côté de la route. Les quatre lignes de forage étaient réparties comme suit :

- neuf forages verticaux depuis la rive droite du barrage traversant la RD113, cinq forages inclinés dans le rocher de l'autre côté de la route (FP-primaires, FS-secondaires),
- quatre forages inclinés dans le rocher de l'autre côté de la route (FWP),
- trois forages inclinés dans le rocher de l'autre côté de la route (FVP),
- trois forages de contrôle, légèrement inclinés dans le rocher de l'autre côté de la route (FH)

Les forages ont été réalisés en destructif, à l'air et au marteau fond de trou 3" (Ø90). Des cavités (vides de 10 à 15 cm) avec des venues d'eau ont été identifiées lors de la réalisation de certains forages inclinés (FP5, FP6, FP7). Durant les travaux, la route départementale a été aménagée afin de permettre une circulation alternée.

La longueur des forages a été définie de façon à ce que le fond de forage soit ancré dans le calcaire du Crétacé.

La partie haute des forages a été tubée sur une longueur de 2 m pour limiter les circulations de coulis dans les remblais de chaussée et éviter les dégradations du revêtement de chaussée.

### 3.3.2 Injections

Les injections du voile au large ont été traitées en continuité des injections du barrage et ont ainsi bénéficié des infrastructures et du matériel en place.

Différentes formulations et produits ont été mis en œuvre en fonction des observations faites pendant la foration du voile et les essais de perméabilité effectués avant les injections.

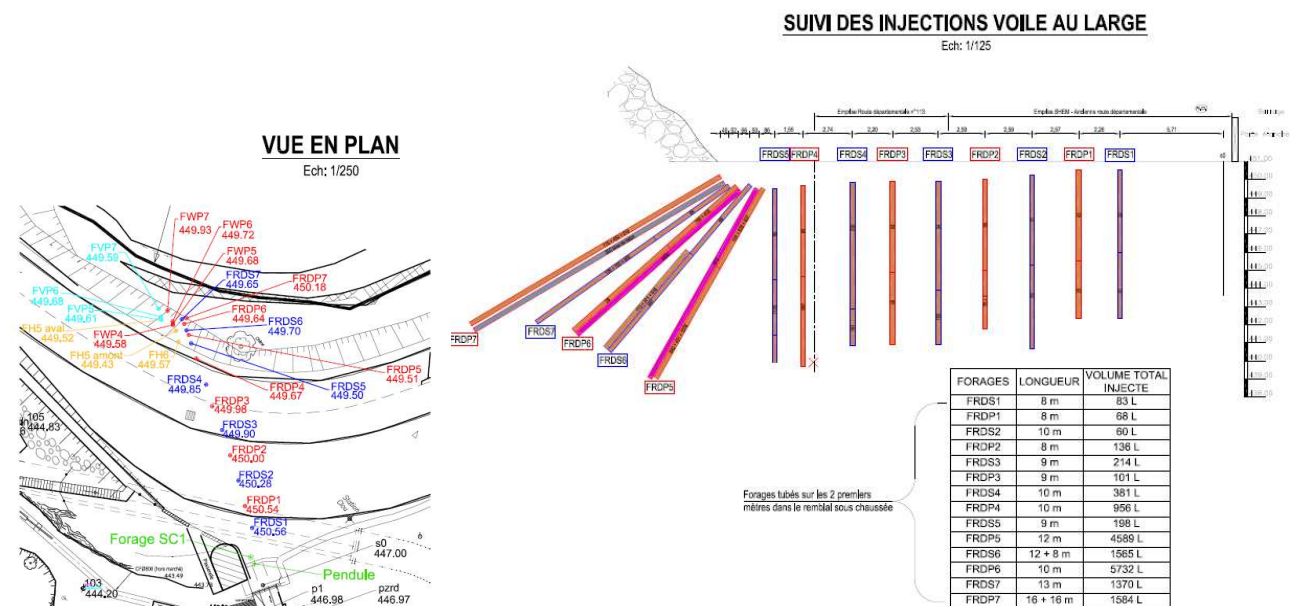
Les forages ont été traités par passes d'injection ascendantes, par passes de 5m.

Un voile secondaire, dans la partie située sous la falaise, positionné à l'aval a été traité en complément pour verrouiller la zone identifiée comme comportant des vides importants.

Deux voiles (tertiaire et quaternaire) intercalés entre les deux précédents voiles ont permis de créer un clavage de la zone. Un obturateur était positionné en partie haute de la chambre d'injection. Les critères d'arrêt et de limitation de pression retenus ont été les mêmes que ceux du corps du barrage : Une pression maximum de 5 bars ainsi qu'un volume consécutif maximum de 1m<sup>3</sup>/ml de forage. Le critère de volume n'ayant jamais été atteint. Le volume total injecté était de 18,8 m<sup>3</sup> réparti entre les forages comme suit :

Forages	Volume injecté	Absorption maxi
1 <sup>ère</sup> ligne : Primaires	7 300 litres (7,3 m <sup>3</sup> )	177 litres/ml → FP4 dans la passe de 5 à 10 m
1 <sup>ère</sup> ligne : Secondaires	3 871 litres (3,871 m <sup>3</sup> )	93 litres/ml → FS7 dans la passe de 5 à 12,5 m
2 <sup>ème</sup> ligne	3 774 litres (3,774 m <sup>3</sup> )	138 litres/ml → FWP6 dans la passe de 0 à 4 m
3 <sup>ème</sup> ligne	777 litres (0,777 m <sup>3</sup> )	51 litres/ml → FVP5 dans la passe de 0 à 4 m
4 <sup>ème</sup> ligne	3 064 litres (3,064 m <sup>3</sup> )	133 litres/ml → FH6 dans la passe de 3 à 10,5 m

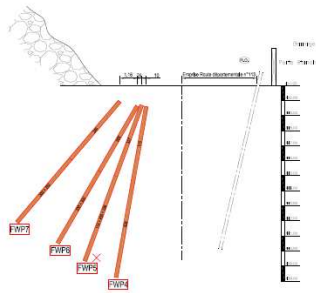
Certains forages ont été injectés au mortier et au béton sur des passes d'injection ponctuelles, constituant les forages primaires de la 1<sup>ère</sup> ligne d'injection : FP5, FP6, FP7.





**SUIVI DES INJECTIONS VOILE AU LARGE COMPLEMENTAIRE**

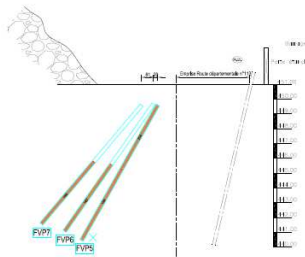
Ech: 1/125



FORAGES	LONGUEUR	VOLUME TOTAL INJECTE
FWP4	11,5 m	541 L
FWP5	11 m	1117 L
FWP6	10,5 m	1085 L
FWP7	10,5 m	891 L

**SUIVI DES INJECTIONS VOILE AU LARGE TERTIAIRE**

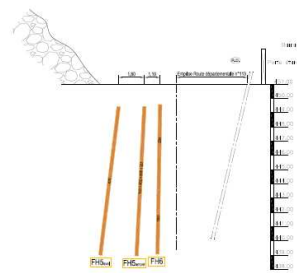
Ech: 1/125



FORAGES	LONGUEUR	VOLUME TOTAL INJECTE
FVP5	10,5 m	388 L
FVP6	10,5 m	195 L
FVP7	10,5 m	184 L

**SUIVI DES INJECTIONS VOILE AU LARGE QUATERNAIRE**

Ech: 1/125



FORAGES	LONGUEUR	VOLUME TOTAL INJECTE
FHS1	10,5 m	479 L
FHS2	10,5 m	1351 L
FHS3	10,5 m	1234 L

Observations particulières :

- Lors du traitement du voile d'injection, le barrage était en surverse,
- Des communications entre forages (essentiellement sur le voile primaire) ont été décelées
- Des circulations vers l'aval (distance de 50m) ont été mises en évidence

### 3.4 Synthèse des injections

Les ratios d'absorption du terrain pour le voile et pour l'appui rive droite sont les suivants :

Voile barrage : 80 l/m<sup>1</sup>

Le ratio du voile d'injection du barrage est bien inférieur à celui, découlant de l'analyse des carottes et des essais d'eau à l'issue des sondages de reconnaissance des maçonneries, et pris en compte lors de l'étude du projet.

Appui rive droite : 787 l/m<sup>1</sup> suivant la répartition ci-dessous :

- Primaire : 1220 l/m<sup>1</sup>
- Secondaire : 100 l/m<sup>1</sup>
- Tertiaire : 30 l/m<sup>1</sup>
- Quaternaire : 120 l/m<sup>1</sup>

Le ratio de l'appui rive droite correspond aux observations faites lors de la foration au sujets des vides et cavités décelés.

Les injections de coulis ont donné lieu au cours de travaux à de nombreuses adaptations et changement de formulation. Il a été décidé dès les premières injections de travailler avec des coulis chargés en fillers. Cette première formulation était bien adapté sur les premières passes permettant de traiter le contact barrage voûte / barrage poids. Par la suite, cette formulation n'a été utilisée que dans les zones pouvant être soit en résurgence vers l'aval soit avec des absorptions très importantes. Les injections se sont poursuivies avec une formulation dosée à un C/E de 0,8 puis en augmentant régulièrement le dosage après 400 à 500 litres de volume injecté sans montée en pression.

En ce qui concerne le forage FS2bis (barrage), un essai de traitement au BETEC 200 (ciment superfin) a été mis en œuvre. Les observations faites lors de la foration (pertes d'eau et résurgences dans le local vanne de vidange) laissaient présager des circulations de coulis importantes dans cette zone. Hors, les traitements des primaires (FP2, FP2bis et FP3) et du secondaire (FS2) implantés au voisinage du local de la vanne de vidange n'ont pas complètement eus les résultats envisagés. C'est pour cela qu'une formulation avec un produit fluide a été choisie pour l'injection du forage FS2 bis. Les absorptions étaient bonnes mais le résultat est difficile à qualifier. Il n'avait été approvisionné qu'une quantité limitée de ce produit. En effet les absorptions ont été telles que le forage n'a pu être traité en totalité avec ce seul ciment. La zone du contact béton/rocher a été traitée avec un coulis de ciment (C/E =0,8). On remarque enfin, pour la galerie, que le FS1 a été traité au mortier et qu'il confirme la fracturation et l'hétérogénéité de consistance de l'encaissant de la partie sommitale de la rive droite.

En ce qui concerne le voile au large, la zone à l'aplomb de la chaussée est de bonne qualité. On trouve assez rapidement un rocher compact et homogène. Des essais d'eau de type Lugeon ont confirmé la faible perméabilité de la zone

La partie située sous la falaise rive droite bordant la route départementale au niveau de la crête présente des vides et cavités (grandeurs de l'ordre de quinze à vingt centimètres), avec, parfois, présence d'eau. Des communications vers l'aval ont été observées pendant les injections. Les injections de mortier dans ces horizons ont donné un bon résultat. Un test au béton s'est avéré peu efficace.

## 5. PERCEMENT DU BARRAGE

Dans le cadre du chantier de la création de l'usine pour le turbiné du débit réservé du barrage de Ste Engrâce, une prise d'eau a été créée en rive droite du barrage, traversant le corps de la voûte en partie basse au voisinage de la crête de l'ancien barrage. L'ensemble du chantier de percement du barrage a été réalisé en période d'étiage et en phase d'abaissement de la retenue et avant la remise en eau de la voûte. Cependant l'environnement Karstique du site avec une zone d'influence étendue et le risque orageux ont été systématiquement pris en compte pour les choix techniques effectués.

Ce chantier s'est scindé en plusieurs opérations simples mais nécessitant un phasage et une planification fine :

- Mise en place d'une cloche de protection au site de débouché amont prévu
- Renforcement de la structure du barrage au droit du percement
- Percement de la voûte du barrage pour mise en place de la conduite d'adduction
- Scellement de la conduite et condamnation provisoire de l'exutoire aval à l'aide d'un fond plein

### 5.1 Mise en place d'une cloche de protection

La mise en place de la cloche a été la première opération effectuée, avant toute opération de percement et après abaissement du plan d'eau. Elle s'est déroulée comme indiqué ci-dessous :

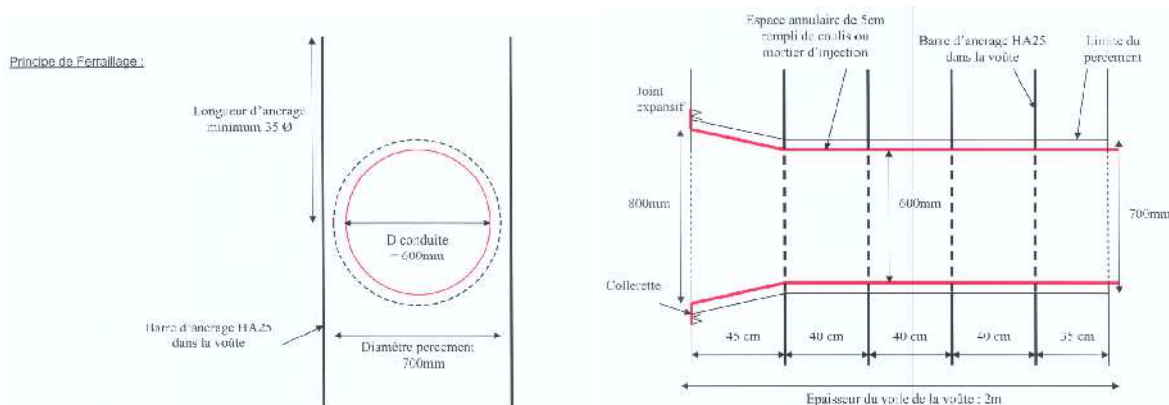
- 1) Implantation par un géomètre de l'axe du forage sur le parement amont
- 2) Report de l'axe sur le parement aval
- 3) Réalisation d'un perçage destructif  $\varnothing 32$  mm, depuis l'aval, à l'axe du forage pour valider l'implantation et
- 4) permettre un contrôle ultérieur de l'étanchéité de la cloche de protection
- 5) Présentation du bouclier à l'aide d'une grue automotrice
- 6) Percement des trous de fixation
- 7) Mise en place des ancrages de fixation et scellement
- 8) Mise en place et Fixation de la cloche de protection
- 9) Vérification de l'étanchéité du joint périphérique par remontée du plan d'eau.

Cette cloche de protection permettait de garantir la sécurité de l'ouvrage et des intervenants en cas de remontée intempestive du plan d'eau.

### 5.2 Renforcement de la structure du barrage

Les études préliminaires ont révélé la nécessité de renforcement de l'existant dans la phase entre le percement du barrage jusqu'au scellement de la conduite acier. La note de calcul dimensionnant le ferrailage à mettre en œuvre pour reprendre la concentration des contraintes localement appliquées a été réalisée par Tractebel Engineering, prescrivant le scellement d'aciers verticaux de part et d'autre du percement.

Le renforcement de la structure a été réalisé préalablement aux opérations de percement et en période d'abaissement de la retenue.



Le mode opératoire retenu a été le suivant :

- Mise en station de l'atelier de carottage depuis la galerie de circulation du barrage
- Forages carottés de diamètre 56mm sur une profondeur de 4,10 mètres.
- Mise en place et scellement des ancrages HA25 de longueur 2,00ml,

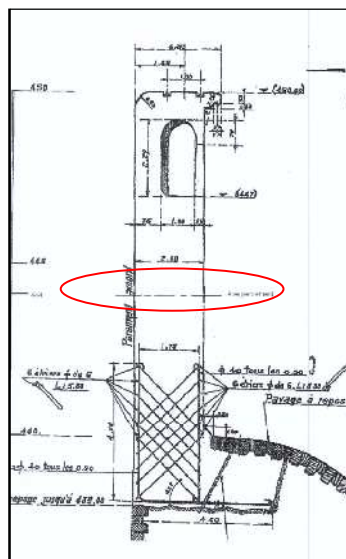
La réalisation de l'opération depuis la galerie, bien que techniquement plus complexe, a été retenue parce qu'étant celle garantissant au mieux la sécurité du personnel exécutant.

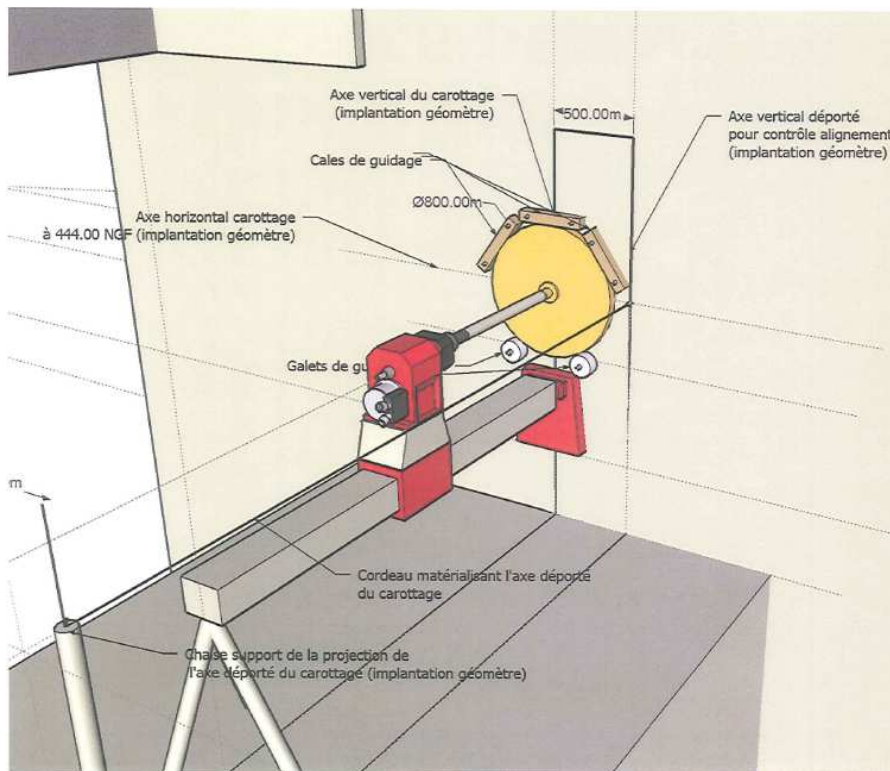
### 5.3 Percement de la voûte

La méthode de percement de la voute du barrage retenue est celle d'un carottage suivant le mode opératoire suivant :

- Implantation de l'axe du carottage et des axes déportés nécessaires au contrôle en cours de foration par un géomètre, matérialisation des axes (mise en place des chaises) ;
- Mise en station et réglage de la carottière (chevillage du support de colonne, au parement, haubannage et calage du mat de glissière de la carottière) ;
- Réalisation d'un carottage  $\varnothing$  200 mm dans l'axe de l'adduction traversant la voûte ;
- Contrôle et validation de la position du débouché du perçage central ;
- Mise en station et réglage de la carottière (chevillage du support de colonne, au parement, haubannage et calage du mat de glissière de la carottière) ;
- Vérification des alignements (mesure de l'horizontalité au niveau posé sur le carottier et vérification par rapport à l'axe déporté) ;
- Mise en place des guides anti ripage de la couronne ;
- Carottage par longueur de 420 mm en diamètre  $\varnothing$  800 mm ;
- Vérification de l'horizontalité au niveau et contrôle du centrage par rapport au perçage  $\varnothing$  200 mm.

La section de percement de diamètre  $\varnothing$  800 mm a permis le passage du convergent en diamètre  $\varnothing$  700 mm. Les carottes et les déchets de démolitions ont été extraits et évacués au fur et à mesure de l'avancement du chantier.



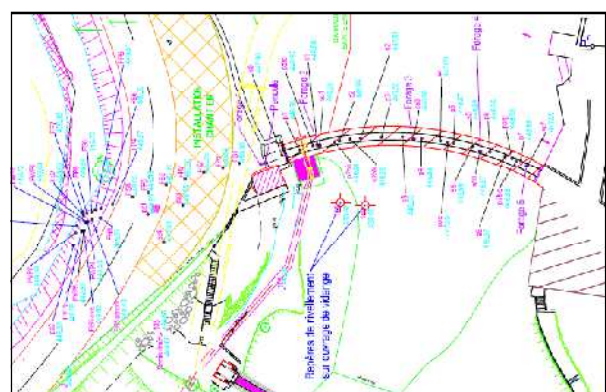


Document TERASTIC

#### 5.4 Scellement de l'adduction en acier

La conduite de prise est en acier mécano soudé d'épaisseur 6mm, et de diamètre  $\varnothing$  600 mm. Le convergent est en  $\varnothing$  700 mm. La mise en place de la conduite s'est faite en positionnant l'élément de conduite en un morceau depuis l'aval à l'aide d'une grue automotrice; un mannequin avait été fabriqué spécifiquement pour la manutention. Une collerette amont a été assemblée par boulonnage. Elle est composée de trois secteurs. Cette collerette a été conçue pour reprendre les efforts de glissement dans le cas où une pression d'eau exercerait un effort dans l'axe de la conduite. En plus de sa fonction première, la collerette a rempli la fonction de coffrage lors du scellement de l'adduction. Un joint hydro gonflant a été positionné entre la collerette et le béton de la voûte. Une collerette aval de même conception a aussi été mise en place. Le scellement a été fait en deux phases. Une première phase avec un béton auto-plaçant jusqu'à au voisinage de la génératrice supérieure. La deuxième phase avec un béton de scellement à retrait compensé pour bloquer les vides. Lors de la foration des aciers de confortement, des forages supplémentaires, situés à l'axe de la conduite, avaient été exécutées pour assurer le coulage et remplir la fonction d'évent.

## 6. CONCLUSIONS



Le barrage de Ste Engrâce est depuis 2010 dans une phase de modernisation.

En plus des sujets que nous avons traités dans ce document (le diagnostic de l'état des matériaux constitutifs de l'ouvrage, les injections, et le percement de la voûte pour la création d'une usine nouvelle), le barrage de Sainte-Engrâce a été le lieu d'un ensemble d'opérations depuis 2010 :

- surélévation des bajoyers rives droite et gauche en amont du barrage, permettant le passage de la crue millénale en toute sécurité
- création d'une usine nouvelle pour le turbiné des débits réservés, dans l'ancienne galerie de dérivation en rive droite du barrage avec la réalisation d'un puits d'accès de 10m<sup>2</sup> de section et de 27 m de hauteur.
- réhabilitation du pendule existant rive droite du barrage;
- création de deux pendules inversés en partie centrale du barrage ;
- création de trois piézomètres au contact rocher un en rive droite, un en partie centrale, un en rive gauche)
- création d'un dispositif de contrôle de la piézométrie sur la rive droite du barrage (quatre nouveaux piézomètres)

Le diagnostic des matériaux constitutifs du barrage de Sainte-Engrâce a conclu sur l'absence du phénomène de gonflement dans le béton de la voûte. Il a également mis en évidence une maçonnerie dégradée, fissurée et très perméable dans le barrage poids. La maçonnerie du barrage a ensuite été traitée par des injections, prolongées sur la rive droite et améliorant ainsi le voile d'injection jusqu'au rocher. Reste à confirmer l'efficacité des injections :

- Dans le barrage poids : l'analyse des carottes extraites du nouveau piézomètre central et des deux nouveaux pendules, suivi de mesures des nouveaux piézomètres au contact rocher.
- Dans l'appui rive droite : suivi des mesures des nouveaux piézomètres créés dans cette zone.

L'analyse des compte rendus des chantiers et l'interprétation des informations provenant des dispositifs dont nous disposons sur cet ouvrage nous permettra de réfléchir au complément de traitement de l'appui rive droite du barrage ainsi qu'à une éventuelle prolongation du voile au large vers l'amont.