

1^{er} avril 2014

La réparation du barrage du Chambon sur Lignon



La délégation Rhône-Alpes de l'AFGC, en partenariat avec EDF et le Groupement Bouygues mandataire des entreprises, a organisé le mardi 1er avril 2014 une Journée Technique consacrée aux travaux de confortement du barrage du Chambon sur la Romanche. Un barrage né du génie d'un grand industriel : Henri FREDT en 1918, et riche d'histoire depuis sa construction par l'entreprise Campenon Bernard de 1929 à 1935. Plus de 40 participants se sont associés à cette manifestation régionale

Rappel du programme

9h15 : Accueil café

9h30 : Accueil des participants et présentation de la journée

Jacques MARTIN, EGIS JMI/Président de la délégation AFGC Rhône-Alpes

9h40 : Présentation du barrage et de la conception technique de son confortement

Olivier CHULLIAT (EDF)

10h30 : Questions/réponses

10h45 : Pause

11h00 : Les études d'exécution

Tancrede DE FOLLEVILLE (SETEC)

11h20 : Présentation des travaux

Cédric JANNIN (BOUYGUES TP RF)

11h45 : Questions/réponses

12h00 : Déjeuner sur place



13h30 : Départ pour la visite du chantier

13h45 : Début de la visite par groupe de 15 personnes

15h45 : fin de la visite

16h00 : fin de la journée

Déroulement de la journée

La matinée s'est déroulée sous forme de conférences pour mieux approfondir la genèse de ces travaux de confortement, qui ne sont d'ailleurs pas les premiers, mais qui sont plus que délicats compte tenu du contexte

géographique du projet (altitude, accès, ...) et surtout spectaculaires par les dimensions de l'ouvrage.

L'après-midi après le repas, nous sommes allés visiter le chantier de confortement pour prendre la mesure des difficultés de l'opération.

Les conférences et le repas se sont déroulés à l'Hôtel Mercure Les Deux Alpes 1800.

Les dimensions de l'ouvrage parlent d'elles même, hauteur de 90 à 137m, longueur 294m, épaisseur en tête 5m et 70m à sa base.

C'est un barrage-réservoir poids situé à 1040m NGF, dont la vocation première est de réguler et sécuriser les débits capricieux de la Romanche. Il a été équipé après sa mise en service d'une centrale électrique avec 2 usines de production, remplacées en 1984 par l'usine de St Guillaume 2, munie de 2 turbines « Francis verticales » (2x58MW, pour 210GWh/an).

Les travaux de confortement portent sur 4 phases de travaux pour un montant d'environ 20M€ :

- des traits de scie (7 sciages représentant env. 2500m²) pour libérer les contraintes internes inhérentes à l'alcali-réaction (RAG) ;
- plus de 400 tirants horizontaux en partie supérieure du barrage pour renforcer son intégrité ;
- un maillage d'environ 6000m² de fibre de carbone complète ce dispositif en reliant les tirants 2 à 2 ;
- et enfin un peu moins de 9000m² de membrane d'étanchéité vient couronner l'ensemble en parement amont.

Synthèse des présentations

Présentation des travaux de confortement

Cédric JANNIN – Bouygues TPRF

Olivier CHULLIAT – EDF-CIH

Tancrede de FOLLEVILLE et Jean-Bernard DATRY – SETEC TPI

Présentation de l'ouvrage et contexte

Le barrage

Construit entre 1930 et 1935

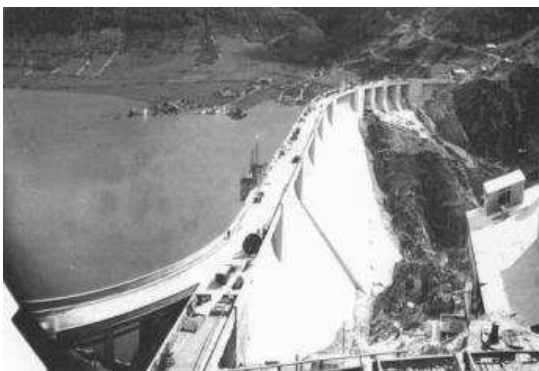
Béton cyclopéen

70 m d'épaisseur à la base / 5 m en crête

300 m de couronnement

Capacité du réservoir : 50 millions de m³

Très ausculté (100 appareils + nivellement)



Le diagnostic de 2007 à 2010

- Les campagnes de reconnaissance

Les manifestations régionales

Forages sécants dans le plan de fissuration

Essais mécaniques sur le béton

Caractérisation du potentiel de gonflement

Inspection du contact béton-rocher par forage

Dilatomètre dans l'appui rive gauche (caractéristiques fondation)

Mesure des contraintes par vérin plat et surcarottage

La fissuration verticale

Risque d'instabilité de blocs amont sous séisme

Les conséquences

- Quatre problématiques à résoudre

→ Fissuration sub-verticale partie haute (entre 1010 et 1038) : présence de plaques ou blocs potentiellement instables, à l'amont du voile de drainage → risque d'ouverture des fissures en cas de séisme

→ Développement de contraintes dans le corps de l'ouvrage : risque potentiel de poussée au vide en RG et de cisaillement du contact béton-rocher

→ Poussée du barrage sur ses rives (RD et RG) : risque potentiel de poussée au vide et de cisaillement de la fondation rocheuse en rive

→ Déplacement vers l'aval des zones rive droite et centrale : compréhension à affiner et risque potentiel de mise en traction du parement amont de l'ouvrage

Synthèse des solutions proposées

Fissuration → tirants

Fissuration → maillage carbone

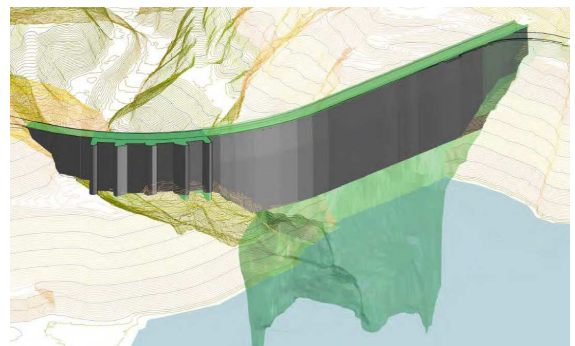
Contraintes et poussées → Sciage

Ouverture des fissures → membrane

Travaux de confortement

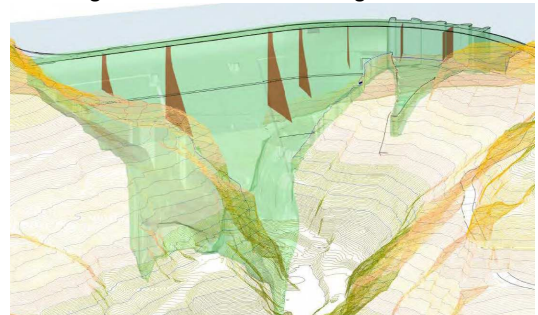
La membrane d'étanchéité

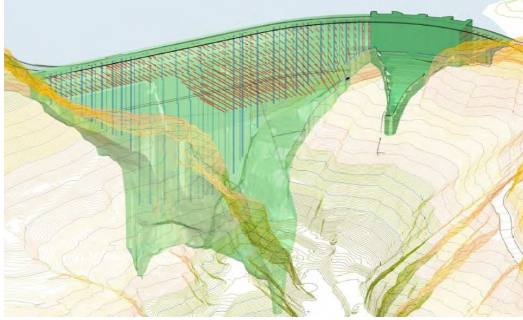
Rôle : amélioration de la stabilité en cas de séisme (Pinterstielle = 0)



Les sciages

Rôle : Allègement contraintes + soulagement rives





La précontrainte – Les dispositions constructives

1- Principe

- 4km de carottages, tolérance 1%
- Ancrages passifs (E) à l'amont, tirants actifs réglables (ER) à l'aval
- Torons gainés graissés + injection des gaines au coulis de ciment Superstresscem
- 62 tirants équipés d'une cellule de charge
- Pesage des tirants par plot 4 semaines après la première mise en tension

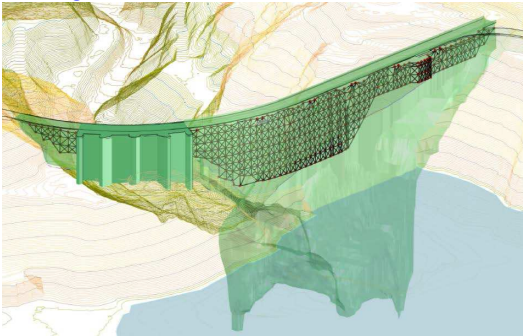
2- Prototype

Réalisation d'essais sur chantier pour valider le bon fonctionnement du dispositif de réglage des ancrages côté actif (ancrages ER)

3- Dimensionnement

- Tirants T15S
- Calcul du nombre de torons de chaque tirant grâce à la prise en compte de la surface réelle de sa maille -> entre 1 et 9 torons par tirant.

Le maillage carbone



Réalisation des études d'exécution

Tancrede DE FOLLEVILLE (SETEC)

1. Dimensionnement des bandes de carbone

Le maillage est composé de 1 382 bandes qui se répartissent en 3 familles :

Les bandes verticales, les bandes horizontales, et les bandes diagonales

La taille moyenne d'une maille est :

$H = 4,00 \text{ m}$; $l = 3,70 \text{ m}$

Les bandes sont en fibre de carbone de largeur 200 ou 300 mm

328 bandes verticales $1,50 \text{ m} < L < 5,75 \text{ m}$

370 bandes horizontales $1,85 \text{ m} < L < 4,46 \text{ m}$

622 bandes diagonales $2,40 \text{ m} < L < 8,34 \text{ m}$

62 bandes particulières $1,94 \text{ m} < L < 5,99 \text{ m}$

Les manifestations régionales

Sollicitations :

- Effort de Séisme :

Effort généré par un bloc de béton qui se détache du barrage sous l'effet du séisme

- Effort de gonflement :

Effort lié au gonflement du béton du barrage sous l'effet de l'alcali-réaction

Déformation longitudinale imposée de $50 \mu\text{m/m/an}$

Dimensionnement réalisé pour une durée de vie de 50 ans

- Combinaison : Séisme + Gonflement

Effort de Séisme : Principe de chargement

La répartition de l'effort sismique surfacique entre les bandes en tissu de fibres de carbone diagonales, verticales, et horizontales est effectuée conformément aux indications du CCTP : les zones entre les bandes forment des triangles, et le découpage suit les barycentres de ces triangles. Le chargement sur les bandes n'est donc pas uniforme mais triangulaire par morceaux.

Principe du calcul : L'effort de design des bandes est pris égale à 80 % de l'effort à rupture (selon CCTP) Une bande composite n'a aucune rigidité de flexion et se déforme en chaînette sous la poussée sismique d'un bloc de parement. Chaque bande de tissu composite a été étudiée individuellement, et modélisée à l'aide du logiciel Pythagore comme un élément de câble sans rigidité de flexion, discrétisé en 18 sous-éléments de longueur courante proche de 20 cm. L'effet du séisme seul, ou du séisme cumulé à un gonflement du béton sont analysés en grand-déplacement.

2. Dimensionnement des dispositifs d'ancrages (niches)

Les 411 dispositifs d'ancrage (niches) permettent de transmettre l'effort normal au plan du barrage, des bandes aux tirants. Ils sont constitués de la manière suivante :

- Une plaque circulaire en acier inox 1.4307 ($f_y = 200 \text{ Mpa}$), dont la partie centrale est évidée, et comportant 8 percements implantés le long d'un cercle pour disposer les 8 tiges d'ancrage filetées de diamètre variant de M20 à M39. Les bandes de carbone passent entre la platine et le parement béton. Un arrondi est réalisé en bordure de la sous-face de la platine afin que les bandes ne soient pas poinçonnées lors de leur mise en charge.
- 8 tiges d'ancrage filetées, en inox de classe 50. Une attache par écrou + rondelle de sécurité Grower en acier inox de même qualité assure la liaison entre la platine et les tiges d'ancrage. Les fibres de carbone sont déviées lors de leur pose de part et d'autre des tiges.
- Une cerce en acier galvanisé. La cerce est percée de 8 trous de même diamètre que ceux de la platine, et la liaison tige filetée – cerce est assurée par 8 assemblages écrou/rondelle + contre-écrou/rondelle, en acier inox de classe 50.

L'effort de traction amené par les bandes est transmis par la plaque circulaire aux tiges filetées, puis à la platine

du corps d'ancrage du tirant précontraint par un mécanisme de bielle/tirant

Le dimensionnement des dispositifs d'ancrage amont comprend les étapes suivantes:

- Calcul des plaques en acier inox (Calcul éléments finis)
- Calcul des tiges filetées (traction des tiges, poinçonnement des tôles)
- Vérification de la compression dans les bielles de béton (BAP C40/50)
- Vérification de l'adhérence de la bielle sur la cerce
- Vérification de la cerce (traction + flexion)
- Vérification de la contrainte locale du béton au contact de la cerce (arrachement)
- Calcul des frettes hélicoïdales de diffusion de la précontrainte

Cas particulier des ancrages de rive : Les ancrages situés en périphérie du maillage doivent reprendre la composante tangentielle de l'effort amené par les bandes

Les bandes de rive s'arrêtent en se recouvrant sur elles-mêmes autour de la platine. L'effort tangent est transmis au béton par cisaillement dans les tiges.

Vérifications complémentaires pour les ancrages de rive :

- Calcul des tiges filetées en traction/cisaillement.
- Vérification de la pression diamétrale (condition de non-éclatement du béton)

3. Dimensionnement des tirants

Le renforcement comprend la mise en oeuvre de 411 tirants horizontaux traversant l'épaisseur du barrage.

Les tirants sont composés de torons gainés graissés circulant dans une gaine en PEHD injectée au coulis de ciment et non solidaire du béton du barrage. L'ancrage amont est passif (type « E »), et l'ancrage aval est actif et réglable (type « ER »). Les capots des ancrages seront injectés à la cire.

- Procédé de précontrainte VSL ; ATE-06/0006
- Torons gainés graissés T15S, de section 150 mm²
- Limite à rupture : $f_{pk} = 1\,860\text{ MPa}$
- Limite élastique conventionnelle : $f_{peg} = 0.88 \times f_{pk} = 1\,636.8\text{ MPa}$
- Contrainte max à la mise en tension 1473.1 MPa
- Module élastique : $E_p = 195\,000\text{ MPa}$
- $4.25\text{ m} < \text{longueur} < 24.05\text{ m}$
- $1 < N_b\text{ T15 S / ancrage} < 9$

Critères dimensionnants :

- L'effort minimal dans le tirant doit rester supérieur à l'effort de séisme. Cette condition fixe la section minimale du tirant, et doit en particulier être vérifiée dans la situation la plus critique suivante : 50 ans après mise en oeuvre du renforcement, sans effet de gonflement du béton, alors que les tirants sont à 10°C de plus que le béton.
- L'effort maximal dans le tirant doit rester inférieur au minimum de 80 % de l'effort à rupture F_{pk} , et 90% de l'effort à la limite élastique F_{peg} . Cette condition

Les manifestations régionales

fixe la tension initiale dans le tirant (c.a.d. la contrainte lors de la mise en tension au vérin), et doit en particulier être vérifiée dans la situation la plus critique suivante : 20 ans après mise en oeuvre du renforcement, avec effet de gonflement du béton, alors que les tirants sont à 10°C de moins que le béton.

Organisation du chantier et moyens mis en oeuvre

Les contraintes principales du chantier

- la circulation routière
- le planning
- l'altitude
- l'exploitation de la retenue et le risque de crue

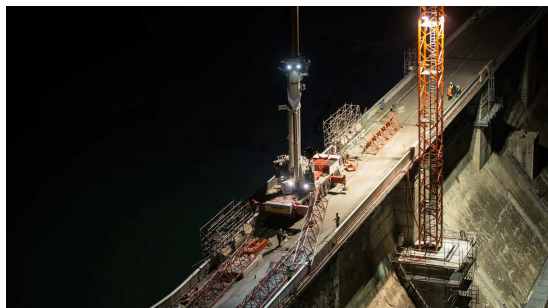
Moyens de manutention et accès au parement

1- Moyens de manutention

Mise en place de 2 grues à tour MD345 sur pieds de scellement, couvrant l'ensemble des zones de travail et de capacité suffisante pour les besoins du chantier -> G1 sur plateforme amont rive gauche, G2 sur le parement aval

Mise en place d'un « tunnel » pour transfert de charges d'un parement à l'autre

Installation de G2 et du « tunnel » de nuit (fermeture circulation)



Montage de la grue G2

2- Moyens d'accès au parement

11000m² d'échafaudages

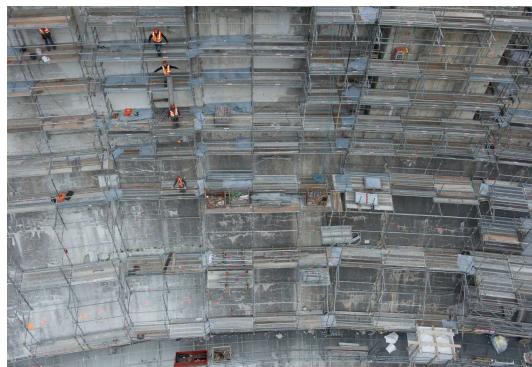
Parement aval : échafaudages en appui sur le parement

Parement amont : mise en place d'une console rive à rive reprenant les charges des échafaudages

Conception des échafaudages :

Classe 4

Mise en place de consoles en face de chaque tirant pour amenée/repli de matériel à la grue au droit des zones de travail (capacité = 1200kg répartis sur 2 consoles)



Echafaudage aval

1- Palonnier déporté

➤ Objectifs :

Eviter les manutentions manuelles du matériel «lourd» dans les échafaudages

Apporter ce matériel au plus près des zones de travail à travers les échafaudages

➤ Utilisation notamment pour :

Amenée/repli des vérins

Amenée/repli des ancrages du maillage carbone (80kg/unité)

2- Berceau de manutention des gaines et torons :

➤ Objectifs :

Amenée des gaines et torons (longueur jusqu'à 25m) au poste de travail à l'aide des grues

Enfilage « direct » des gaines et torons

3- Paniers pour amenée/repli de matériel :

➤ Objectifs :

Amenée/repli du petit matériel et des produits sur les échafaudages, pour limiter le transport « manuel » dans les sapines

Utilisation des consoles sur échafaudages



Les manifestations régionales

4- Bennes à déchets :

➔ Objectifs :

Evacuation au fil de l'eau des déchets issus du carottage et du piquage

Aucune surcharge sur les planchers d'échafaudages ->

Bennes auto-vides 500L spécifiques, mises en place sur les consoles des échafaudages

5- Machine de bouchardage du parement intérieur des niches

➤ Objectifs :

Obtenir une rugosité satisfaisante sur la circonférence des niches pour une bonne reprise de bétonnage

Ergonomie

Machine de bouchardage adaptable au diamètre des niches, et équipée d'un système d'aspiration,

Accueil sécurité

Les principaux risques du chantier

Circulation routière

Manoeuvres d'engins

Chute de hauteur, chute de plain pied

Passage au-dessus de l'eau

Survol de charges

Chute d'objets

Machines tournantes (foreuses, câbles de sciage, etc...)

Appareils à pression (précontrainte)

Quelques règles à respecter

Porter ses EPI (casque, chaussures de sécurité, gilet fluo, gants)

Cheminer sur les accès sécurisés/balisés

Rester groupé lors de la visite, ne pas s'isoler

Refermer les portillons, refermer les trappes sur les échafaudages

Ne pas passer sous une charge élinguée

Rester à distance des postes de travail