

Réalésage et percement de galeries dans deux barrages en exploitation

Reaming and boring galleries into two dams in operation

Christine, E., NORET, David, P., LEVRAT

Tractebel Engineering France – Coyne et Bellier
Le Delage – 5 rue du 19 mars 1962 – 92622 Gennevilliers – FRANCE
christine.noret@gdfsuez.com, david.levrat@gdfsuez.com

Raymond, M., ARNOULD
FRANKI sa – Chemin des Moissons, 10, Pac artisanal des Cahottes, 4400 Flemalle – BELGIQUE
raymond.arnould@franki.be

MOTS CLÉS

Barrage, réhabilitation, galerie, marteau piqueur sur chenille, ciment expansif, explosif, hydrodémolition, haveuse, attaque ponctuelle.

RÉSUMÉ

Dans le cadre de travaux de confortement ou de réhabilitation, la réalisation de travaux en fondation (voile d'injection, rideau de drainage, mise en place ou renforcement de l'auscultation) peut induire la nécessité d'agrandir une galerie existante, voire même d'en créer une. L'article présente deux cas pour lesquels ces travaux ont été effectués sans vidanger les retenues amont.

Le premier concerne le réalésage de la galerie périmétrale du barrage de Robertville en Belgique pour reprendre le voile d'injection et créer un voile de drainage. Il a donc été décidé d'agrandir cette galerie pour la mettre dans un gabarit de hauteur 2m50 et de largeur 2 m. Plusieurs techniques de réalésage ont été testées : marteau piqueur sur chenille, ciment expansif, explosifs et finalement hydro-démolition.

Le second concerne la création d'une nouvelle galerie dans le barrage de Beni Haroun en Algérie pour renforcer sa capacité de drainage. Située dans le corps de l'ouvrage, elle a été percée par une haveuse, une machine à attaque ponctuelle, et affiche un diamètre équivalent d'environ 3 m. Cette technique complète les alternatives déjà employées dans le cadre du projet de Robertville.

ABSTRACT

In the framework of reinforcement or rehabilitation works, achieving foundation works (grout and/or drain curtains, installation or enhancement of monitoring) may induce the need to expand an existing gallery, or even to create one. The article presents two cases in which the work was carried out without emptying the upstream reservoirs.

The first one concerns the reaming of the perimeter gallery in Robertville dam in Belgium to redo the grout curtain and create a drainage curtain. It was therefore decided to expand this gallery to a size of 2m50 height and 3 m width. Several reaming techniques have been tested: pneumatic drill on caterpillar, expansive cement, explosives and finally hydro-demolition

The second one concerns the creation of a new gallery in Beni Haroun dam in Algeria to strengthen its drainage capacity. Located in the dam body, it has been pierced by a cutter, a road header, and displays an equivalent diameter of about 3 m. This technique complements the alternatives already employed in the project Robertville.

1. INTRODUCTION

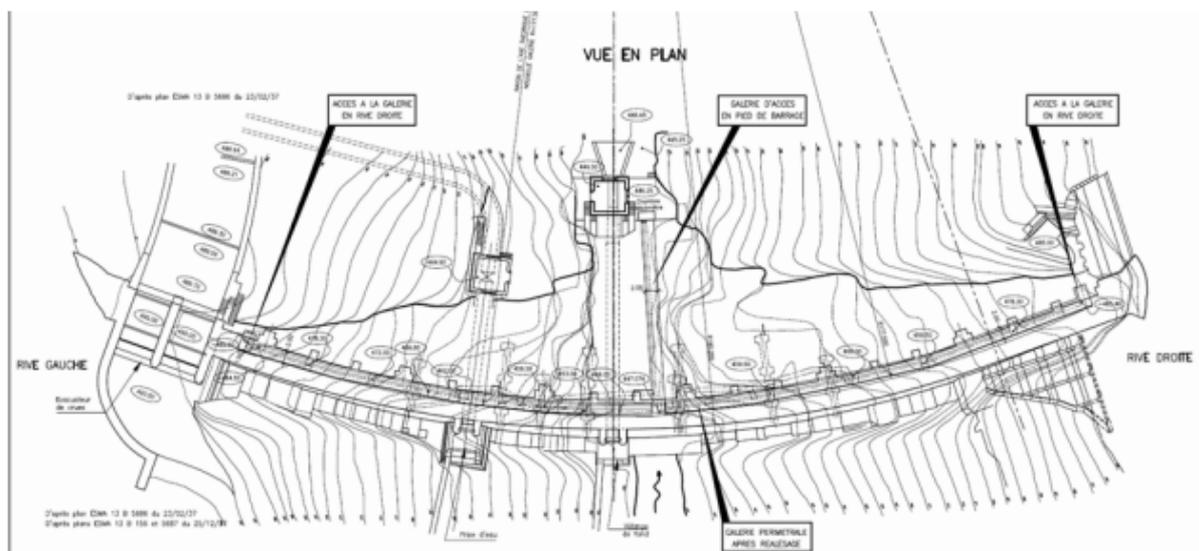
Dans le cadre de travaux de confortement ou de réhabilitation d'un barrage, la réalisation de travaux en fondation de l'ouvrage (voile d'injection, rideau de drainage, mise en place ou renforcement de l'auscultation) peut induire la nécessité d'agrandir une galerie existante, voire même d'en créer une. Deux cas sont présentés pour lesquels ces travaux ont été effectués sans vidanger les retenues amont :

2. REALESAGE DE LA GALERIE PERIMETRALE DE ROBERTVILLE

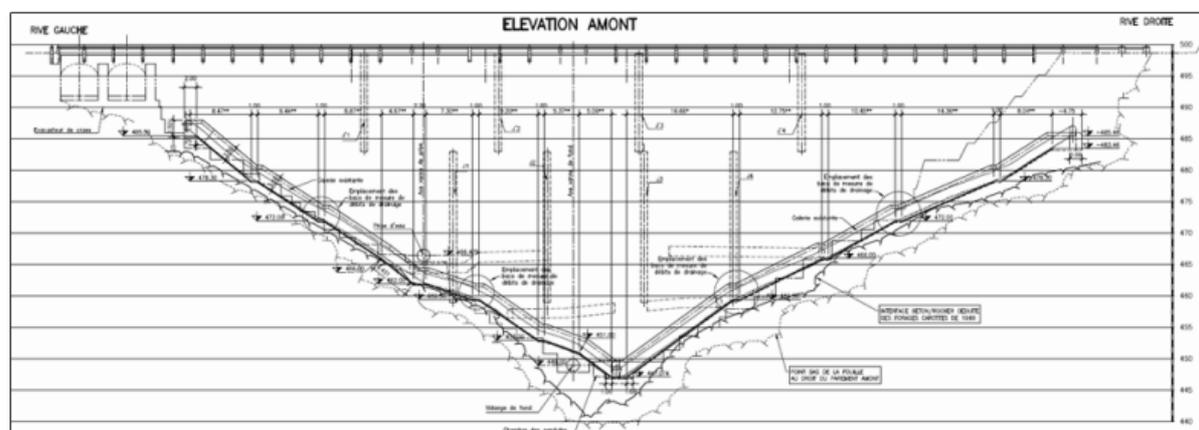
2.1 Brève description de l'ouvrage

Le barrage de Robertville est un barrage poids en béton, construit sur la Warche, au sud de Liège, de 1926 à 1929. Légèrement arqué, sa hauteur maximale sur fondation est de 54 m et sa longueur en crête de 180 m. Son parement amont a un fruit de 0,03 et son parement aval de 0,675. Il est équipé (graphiques n° 1 et 2) :

- d'une vidange de fond en partie centrale dans l'axe de la vallée, constituée d'une conduite de 2 m de diamètre d'une capacité de 33 m³/s sous retenue normale. Cette conduite traverse l'épaisseur de l'ouvrage pour aboutir en aval dans la chambre de manœuvre de la vanne de réglage,
- d'une conduite de prise d'eau de 2 m de diamètre traversant l'ouvrage et débouchant au pied aval dans la chambre de prise située en rive gauche,
- d'un évacuateur de crue implanté à l'extrémité rive gauche d'une capacité de 196 m³/s.



Graphique 1 : Vue en plan de l'ensemble du barrage

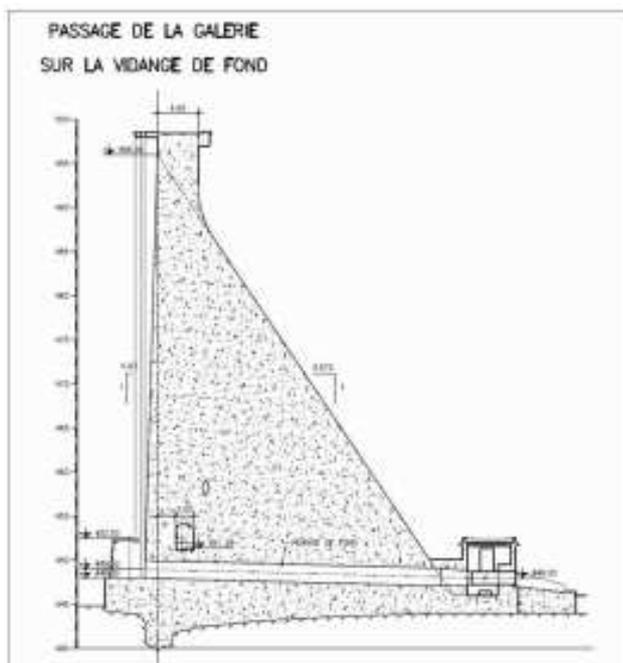


Graphique 2 : Vue en élévation amont de l'ensemble du barrage

Dès la construction, une galerie périmétrale a été aménagée dans la base de l'ouvrage (Graphique n°2). Ses caractéristiques étaient les suivantes (Graphiques n° 3 et 4) :

- En plan, implanté à environ 3 m du parement amont, son tracé épouse la courbure du barrage.

- En élévation, la galerie suit l'assise du barrage sur le rocher qu'elle effleure d'ailleurs à certains endroits. Les pentes moyennes des deux branches de la galerie sont respectivement de 50% en rive gauche et 46 % en rive droite.
- Les accès se font en partie haute d'une part en rive droite et rive gauche par deux baies voûtées découpées dans le parement aval, et en fond de vallée par la galerie de pied, amont-aval.
- La section moyenne des galeries est de de 1,55 m², avec une hauteur moyenne en clé de 1,50 m et une largeur moyenne en pied de 0,78 m.
- La galerie a une longueur cumulée approximative de 165 m.



Graphique 3 : Coupe transversale



Graphique 4 : Photo de la galerie initiale

Le béton utilisé pour la construction de l'ouvrage a été réalisé au moyen de ciment de Hagondange (ciment à durcissement lent, probablement de type métallurgique) et d'agréments provenant du concassage de roches quartzitiques. La granulométrie n'est pas connue mais plusieurs rapports d'expertise mentionnent la nature schisteuse d'une partie des gros agrégats. Le béton est dosé à 300 kg/m³ de ciment sous la cote 472 et 250 kg/m³ au-dessus de cette cote. Des blocs rocheux ont été incorporés au mélange de base par déversement direct dans les coffrages lors du bétonnage.

Les sondages par carottage ont montré que la qualité du béton de l'ouvrage est hétérogène. Les bétons de masse du barrage peuvent être qualifiés d'acceptables à bons avec des RQD supérieures à 56%. Les carottes se caractérisent par une forte teneur en pâte, les gros cailloux étant rarement jointifs. Les prélèvements en pied amont sous la galerie attestent d'une circulation d'eau de percolation et sont de qualité plus médiocre.

Un diagnostic moderne de cet ouvrage a conclu notamment à la nécessité de reprendre totalement le voile d'injection en fondation et en rives, de créer un vrai voile de drainage et de mettre en place un suivi des pressions interstitielles en fondation par des piézomètres. La galerie périmétrale existante ne permettant pas d'introduire l'équipement nécessaire à la réalisation des travaux, il a été décidé d'agrandir cette galerie pour la mettre dans un gabarit de hauteur 2m50 et de largeur 2 m.

Les travaux ont été réalisés par la société Réforme-Franki de Novembre 2007 à Juin 2009 et plusieurs techniques de réalésage ont été successivement testées : marteau piqueur sur chenille, ciment expansif, explosif et finalement hydro-démolition.

2.2 Travaux de réalésage

2.2.1 Essais préalables

Dans un premier temps, des essais de démolition ont été réalisés à l'entrée de la galerie en rive droite. Ces essais avaient 3 objectifs :

- comparer les techniques du fraisage et du brise roche : le rendement de fraisage (environ 0,5 m³/h) s'est avéré inférieur au rendement du brise roche (environ 0,7 m³/h) ; la granulométrie des marins de fraisage était plus petite que celle obtenue par le brise roche, avec un dégagement de poussière nettement plus important ; la précision du découpage à la fraise était en revanche nettement supérieure.
- analyser le comportement de la mini-pelle, support de l'outil d'excavation : la machine était déséquilibrée vers l'avant, et ce quel que soit son poids (1,5 T ou 3 T). Le gabarit réduit de la galerie imposait en effet un dépliement du bras, du balancier et du marteau, imposant une distance d'au moins 3 m entre le point d'impact et le train de chenille.
- estimer une cadence, et donc une durée probable des travaux.

Le choix de l'entreprise s'est orienté vers un porteur Brokk 180 électrique télécommandé et équipé d'un brise roche (graphique 5), deux fois plus cher mais beaucoup plus stable et maniable qu'une mini-pelle.



Graphique 5 : Brokk 180 dans la galerie de pied, puis périmétrale



Graphique 6 : Exemple avarie

2.2.2 Sens de progression

Afin de pouvoir évacuer les marins en profitant de la gravité, le réalésage a démarré par la galerie de pied amont-aval. Ensuite, il a été opté pour une attaque montante d'une part car la machine continuait sur sa lancée, d'autre part car l'évacuation des marins était plus simple et surtout plus sûre dans une section élargie.

2.2.3 Avancement

Si le rendement instantané était comparable à celui mesuré lors des essais, le rendement moyen restait bien inférieur car d'une part l'outil ripait et le machiniste, guidant sa machine à l'aide d'un joystick, avait du mal à ressentir les réactions du porteur, et la section inévitablement se resserrait en un tronc de cône, d'autre part des pannes sont intervenues de plus en plus fréquemment, d'abord sur les vérins hydrauliques du bras, puis les arbres de fixation des vérins et enfin le marteau lui-même. Le rendement moyen était de l'ordre de 10m/mois (au lieu des 30m/mois escompté), le passage en poste de 12h, puis 2 postes de 8h, contrebalançant tout juste les pertes de temps dues aux pannes et à l'attente des pièces de rechange venant de Suède.

2.2.4 Alternative 1 : Utilisation d'éclateurs pneumatiques puis hydrauliques

Le but était de fracturer le béton avant de l'attaquer. Le système requérait la réalisation de préforages dans lesquels étaient introduits des couteaux (système DARDA d'Atlas Copco) dont l'écartement était

obtenu par poussée pneumatique ou hydraulique. Le procédé s'est avéré trop lent pour passer à une production.

2.2.5 Alternative 2 : Utilisation de ciment expansif

Là encore, le but était de fracturer le béton préalablement à l'abattage. Pour cela, des trous ont été forés selon un quadrillage, chargés en ciment expansif CEMALTEX et laissés en place pendant au moins 12h. Avec un maillage de 35x35 cm (23 trous au total), est apparue une seule fissure verticale de longueur 70 cm et de profondeur 50 cm, à 20 cm du flanc de la galerie !

Cet échec peut être expliqué par : la création d'un effet voûte lors du gonflement lent, qui vient contrecarrer le processus de création des fissures, un matériau béton peut être « trop mou » qui absorbe les déformations sans se fissurer, les conditions hygrométriques variables et non maîtrisables entraînant une désynchronisation du gonflement,....

2.2.6 Alternative 3 : Utilisation d'explosifs

Cinq tirs d'essai unitaire de 56 à 100gr d'explosif au fond de forages d'1m de profondeur ont été réalisés par la société DGOM³ avec mesure des vitesses des ondes de vibration en 6 points à l'aide de capteurs « mini-seis » de la société White. La position des capteurs a varié au cours des essais pour mesurer les vitesses particulières dans des champs éloignés (crête de l'ouvrage, pied aval) mais aussi dans les champs proches (dans les galeries rive à rive et amont-aval à des distances comprises entre 6 et 25m).

Les mesures ont présentées des résultats difficilement interprétables et n'ont pas permis de caler une loi d'amortissement des vibrations de type Chapot-Dowding. Cette alternative a donc été abandonnée.



Graphique 7 : Avant

Après

Graphique 8 : Zoom sur le forage

2.2.7 Alternative 4 : Brise roche sur machine thermique et attaque descendante

Devant les difficultés rencontrées et les coûts importants générés, la méthode en « attaque descendante » avec mini-pelle 1,5T thermique équipée d'un brise-roche est ensuite retenue. Pour évacuer les marins du front d'abattage vers la galerie, un toboggan constitué de tôles de 3m de longueur, déposées de bas en haut comme des tuiles de toitures. Le dispositif est complété par une alimentation continue en eau censée améliorer le transit vers la galerie de pied.

En pratique, d'importants bouchons se sont régulièrement formés obligeant à une élimination manuelle dans des conditions pénibles. D'autre part, le marinage hydraulique a augmenté considérablement l'entraînement des fines et par conséquent la fréquence de curage du bassin de décantation par lequel transitaient toutes les eaux du chantier. Si la cadence a été nettement améliorée, le rendement n'était toujours pas au rendez-vous et une dernière méthode plus performante a finalement été testée.

2.2.8 Alternative 5 : Hydro-démolition sur machine thermique et attaque descendante

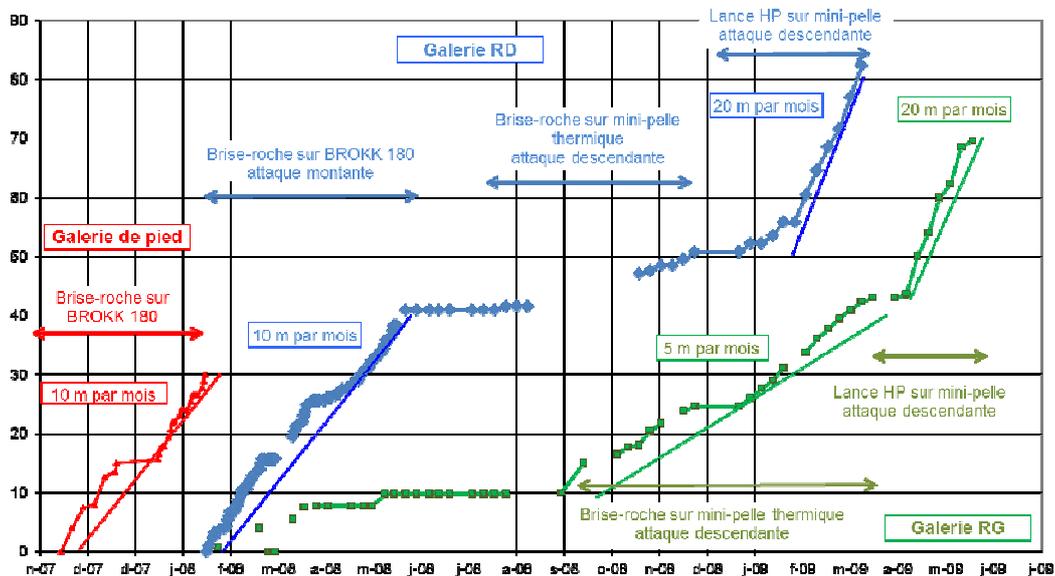
Le porteur mini-pelle a été équipé d'une lance haute-pression reliée à un groupe hydrophore permettant de fournir un débit d'eau de 200 l/min à une pression de 1200 bars. Ce groupe était alimenté par un groupe électrogène d'une puissance de 600 CV. L'eau était pompée dans le réservoir amont, décantée et filtrée avant d'être injectée dans le circuit. Pour assurer le balayage du front, la lance était montée sur un mécanisme oscillant de droite à gauche et se déplaçant de bas en haut le long d'une crémaillère de 0,50m. Le marouflage hydraulique était assuré par l'eau de la lance. Le rendement escompté fut finalement atteint. Les opérations de réalésage d'un volume de 834 m³ de béton furent terminées en 19 mois.



Graphique 9 : Galerie terminée et équipée

2.3 Conclusion

Des caractéristiques intrinsèques du matériau difficiles à connaître avec précision au préalable malgré les tests réalisés. Mais surtout un milieu exigu, très fortement pentu, qui rend difficile l'accès à des machines capables de développer de fortes puissances d'attaque. Seule l'hydro-démolition, avec sa puissance déportée de 600 CV transmise à un jet HP de 12 mm² de section était en mesure de relever le défi. Mais son coût nettement plus élevé l'a éliminé au départ et elle n'a pu s'imposer qu'à la fin. Le graphique ci-après montre l'avancement au cours du chantier.



Graphique 10 : Creusement des galeries : Avancement cumulé du réalésage

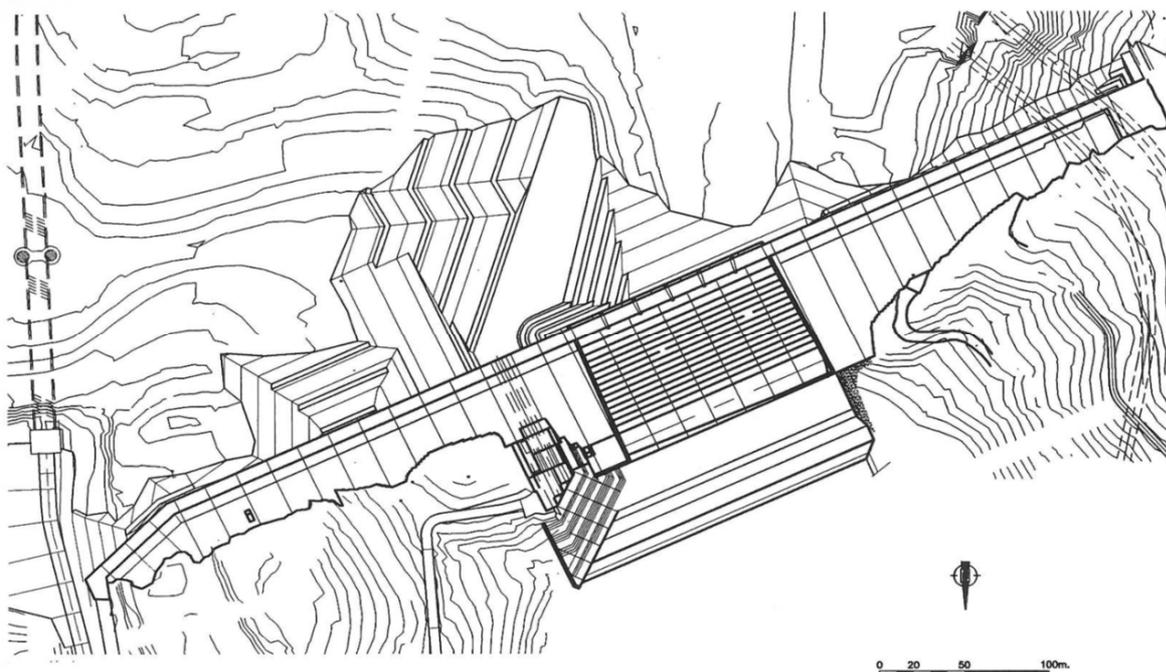
3. CREATION D'UNE NOUVELLE GALERIE A BENI HAROUN

3.1 Brève description de l'ouvrage

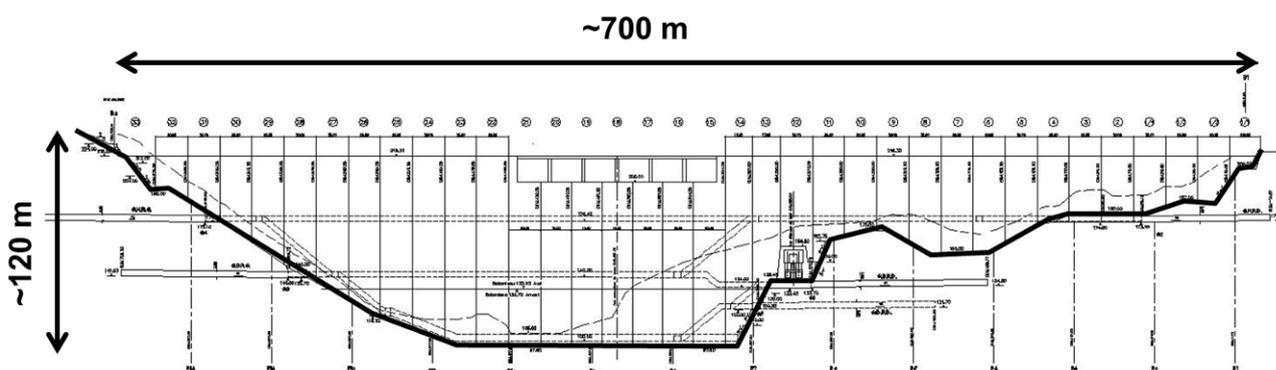
Le barrage de Beni Haroun est un barrage poids rectiligne en béton compacté au rouleau (BCR), construit entre 1988 et 2001 sur l'oued Kebir, à une quarantaine de km de son embouchure dans la mer Méditerranée et à environ 40 km au NNW de la ville de Constantine (Algérie). Sa hauteur maximale sur fondation est de 121 m pour une longueur en crête de 710 m. Le parement amont est vertical ; le parement aval est incliné à 0,8 H pour 1 V. L'aménagement comporte les deux ouvrages de restitution suivants :

- un évacuateur de surface intégré à la partie centrale du barrage, se terminant par un saut de ski et d'une capacité de 13 230 m³/s ;
- une vidange de demi-fond contiguë à l'évacuateur, constituée de deux puits se terminant par un saut de ski et dimensionnés pour évacuer un débit de 670 m³/sec sous le niveau de retenue normale.

Le barrage de Beni Haroun est un des éléments clef d'un grand transfert d'eau ; sa capacité de stockage est de 963 millions de mètres cubes.



Graphique 11 : Vue en plan de l'ensemble du barrage de Beni Haroun



Graphique 12 : Elévation amont du barrage de Beni Haroun

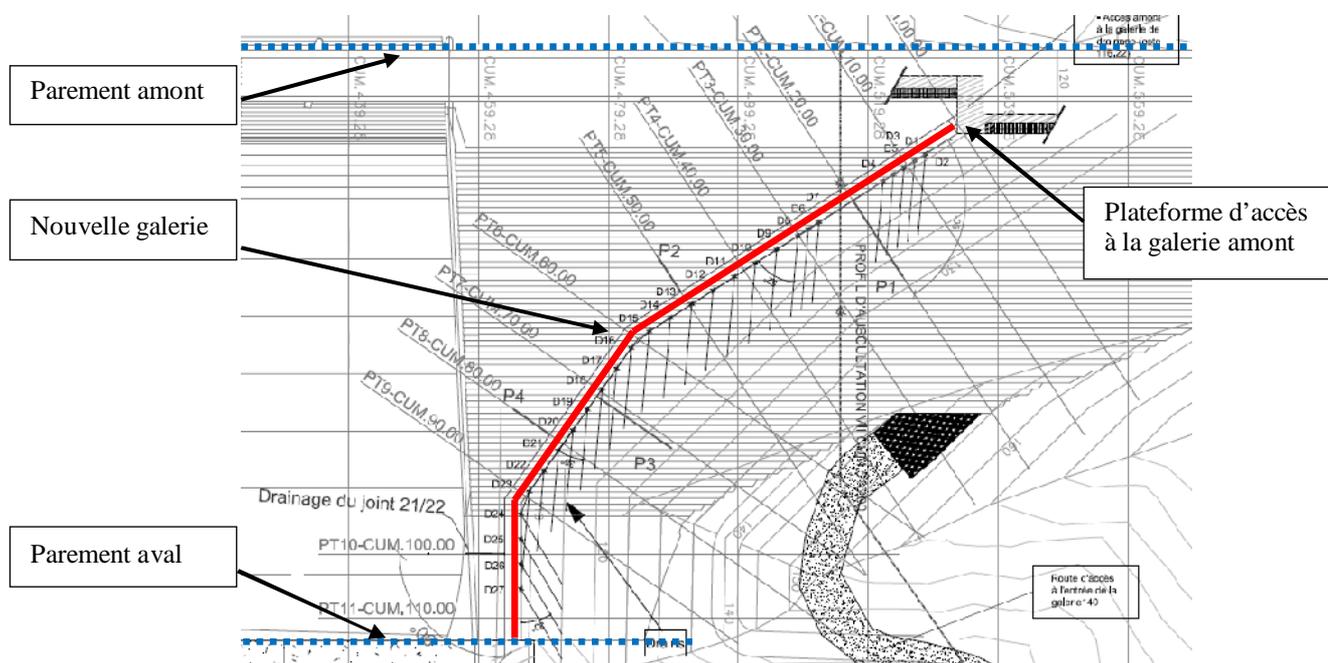
3.2 Définition des travaux

Lors de la mise en eau du barrage en octobre 2003, l'apparition de résurgences en aval du barrage et les valeurs anormalement élevées des sous pressions sous l'ouvrage ont conduit à diverses opérations d'injections et de drainage complémentaires, dont la réalisation d'une nouvelle galerie forcée dans le corps de l'ouvrage, à partir de laquelle un rideau de drainage intercepte la barre calcaire de fondation.

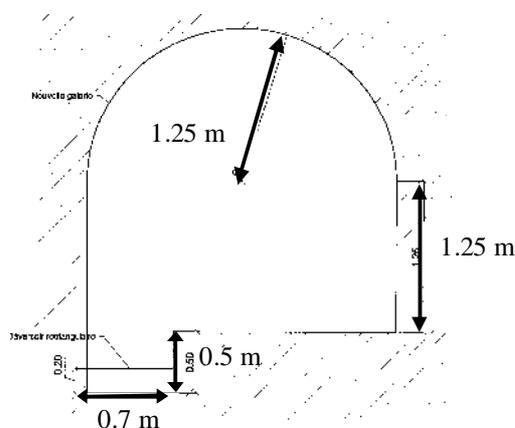
La galerie, longue de 113 m, traverse l'ouvrage d'amont en aval, depuis une plateforme d'accès à la galerie d'injection et de drainage (à proximité du parement amont) jusqu'au parement aval de l'ouvrage. Elle est constituée de 3 tronçons rectilignes subhorizontaux. La section de la galerie est définie par une base de 2,5 m de largeur et de 2 pieds droit verticaux de 1,25 m de hauteur surmontés par une voûte de 1,25 m de rayon. Elle comprend également un caniveau de drainage de section rectangulaire, avec une profondeur de 50 cm et une largeur de 70 cm. La réalisation de la galerie, y inclus le caniveau de drainage, représente au total la démolition d'un volume de béton d'environ 670 m³.

Cette galerie traverse successivement (d'aval en amont) :

- le béton armé du parement aval de l'ouvrage. D'une épaisseur de 2 m, il est constitué d'un ferrailage vertical de $\phi 25$ (maille 0.25 x 0.25 m) et d'ancrage horizontal de $\phi 25$ (maille de 1,2 x 2,5 m) ;
- le béton compacté au rouleau (BCR) présentant une importante résistance à la compression de 30 MPa et constitué de granulats de 35 mm de diamètre ;
- et le béton armé à proximité de la plateforme amont. D'une épaisseur de 2 m environ, il est constitué d'un ferrailage typique de $\phi 25$ mm répartis à raison de 4 par mètre (horizontale et vertical).



Graphique 13 : Vue en plan de la nouvelle galerie



Graphique 14 : Section de la nouvelle galerie

3.2 Réalisation des travaux

Les travaux de percement du BCR ont été réalisés par la société espagnole LIC à partir d'une haveuse de type AM-65 à attaque ponctuelle. Il s'agit d'une foreuse électrique équipée d'une tête double, alimentée par un groupe électrogène de 800 kVA.



Graphique 15 : Haveuse AM-65 à son arrivée sur site et en cours de percement

La quasi-totalité des travaux a été effectuée au moyen de cette haveuse.

L'attaque du béton conventionnel aux deux extrémités de la galerie (2 x 2 m) a été réalisée par disceuse et marteau piqueur manuel (risque d'abrasion excessive des dents de la haveuse sur le ferrailage en place). Le caniveau a pour sa part été réalisé par marteau piqueur monté sur chenille (impossibilité géométrique pour la haveuse de réaliser le caniveau)



Graphique 16 : Travaux de percement hors haveuse (disceuse à gauche et marteau piqueur à droite)

3.3 Critères adoptés

Les principaux critères adoptés pour le percement de la galerie ont été les suivants : nuisance vibratoire, tolérance géométrique et cadence d'avancement.

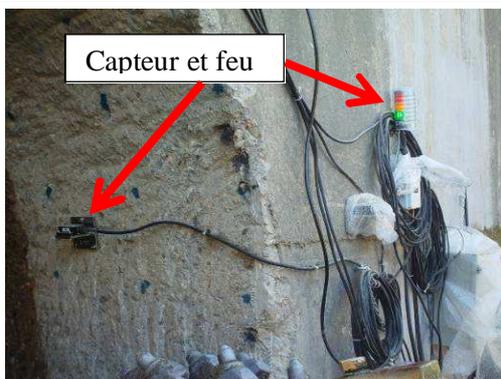
- **Nuisance vibratoire**

La limitation de l'amplitude des vitesses particulières était contractuellement définie comme suit :

- Seuil d'alerte : 25 mm/s ;
- Seuil d'arrêt : 30 mm/s.

Les appareils de mesure de la vitesse particulière employés ont couvert les fréquences au-dessus de 1 Hz, les points de mesure étant implantés sur le béton de parement de la galerie excavée (2 en piédroits et 1 en voûte, à 1 m du front de l'excavation et au-delà). Un feu tricolore permettait de contrôler en direct le niveau de vibration.

Les travaux ont parfaitement respecté les critères de nuisance vibratoire, atteignant très ponctuellement le seuil d'alerte.



Graphique 17 : vue partielle du dispositif de suivi des vibrations

- **Tolérance géométrique**

Les écarts géométriques acceptables étaient contractuellement définis comme suit :

- 3 cm pour la déviation de la position théorique de la galerie (en plan et en profil en long) ;
- 10 cm pour les hors profils locaux.

Pour ce faire, un guidage laser a été mis en place ainsi qu'un suivi de contrôle topographique à l'avancement (section contrôlée tous les dix mètres).

Les travaux ont globalement respecté ces dispositions, après l'acceptation d'un élargissement de la galerie (2,7 m en section droite et 3,0 m au changement de direction au lieu de 2,5 m initialement prévus). Cette modification fait suite au choix par l'entreprise d'une machine puissante, de grande largeur (2,45 m).



Graphique 18 : sections forées par la haveuse (premiers mètres à gauche, section courante à droite)

- **Avancement**

L'avancement minimum acceptable fut défini selon les contraintes climatiques, notamment pour des problématiques d'accès (route aval submergée en cas de déversement). Ainsi, la totalité des travaux de forage devait se limiter à une saison sèche, soit entre avril et novembre.

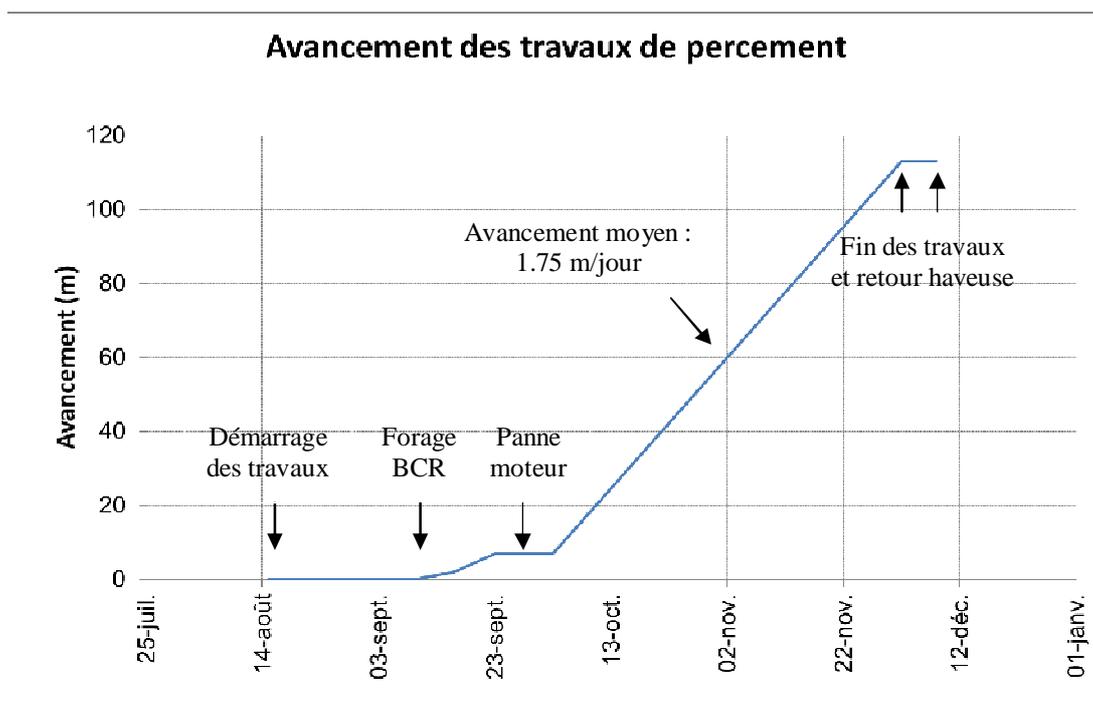
Suite à certains délais administratifs, les travaux de percement se sont finalement déroulés entre le 15 août et 2 décembre 2012. Malgré un problème de surchauffe moteur en tout début de percement (après seulement 7 m), les cadences ont permis de rattraper les retards avec un rythme moyen d'environ 1,75 m/jour sur 60 jours, avec deux rotations par jour.



Graphique 19 : nouvelle galerie débouchant sur la plateforme existante

3.3 Conclusion

Le forage de la nouvelle galerie dans le corps du barrage de Beni Haroun a été satisfaisant. Les nuisances vibratoires ont été correctement respectées et les cadences d'avancement ont permis de rattraper le retard au démarrage des travaux. La section géométrique de la galerie a néanmoins dû être adaptée pour permettre le passage de la haveuse.



Graphique 20 : Avancement du percement de la nouvelle galerie