

# Etudes de réhabilitation du barrage de Zefta sur le Nil en Egypte

## *Rehabilitation studies of Zefta barrage on the Nile River in Egypt*

Olivier MUNOZ, Thierry VINCENT  
ARTELIA EAU ET ENVIRONNEMENT, 6 rue de Lorraine, 38130 Echirolles  
thierry.vincent@arteliagroup.com

### **MOTS CLÉS**

Barrage mobile avec vannes glissières, Investigations, Forage, Maçonnerie, Injection, batardeau en remblai.

### **RÉSUMÉ**

*Réhabilitation du barrage de Zefta sur le Nil en Egypte.*

*Dans le cadre du programme de réhabilitation ou reconstruction des barrages et régulateurs situés sur le Nil, le Ministère Egyptien des Ressources en Eau et de l'Irrigation a mandaté le bureau d'étude ARTELIA Eau & Environnement (ex-SOGREAH) pour la réalisation des études de réhabilitation/reconstruction du barrage de Zefta.*

*Situé dans le delta du Nil, sur la branche de Damiette, le barrage de Zefta contrôle le niveau amont du bief permettant ainsi d'irriguer plus de 420 000 ha via deux régulateurs principaux. Construit en 1902 et conforté en 1954 afin de sécuriser la demande en eau, le barrage présente aujourd'hui des signes de faiblesse imposant la réalisation de travaux importants. Suite à la présentation des options de réhabilitation et de reconstruction, le Ministère a choisi de continuer l'exploitation du barrage existant amenant donc aux études détaillées de sa réhabilitation.*

*Ces études de réhabilitation ont conduit ARTELIA à lancer plusieurs campagnes d'investigations du barrage (inspections visuelle et sous-marine, bathymétrie, forages) de manière à cibler au mieux les défauts que présentait sa structure. Certaines ont nécessité la mise en place de moyens importants notamment la construction d'un batardeau en remblai d'une hauteur de 3.50m et d'une longueur de 100m.*

*Les résultats de ces investigations ont permis de mettre en évidence l'hétérogénéité de la qualité des matériaux constituant le corps du barrage amenant donc à prévoir son confortement par des techniques adaptées (injection de la structure).*

### **ABSTRACT**

*Rehabilitation of Zefta barrage located on the Nile River in Egypt.*

*In the frame of the program for either rehabilitation or replacement of the old main barrages on the Nile River, the Ministry of Water Resources and Irrigation appointed ARTELIA Eau & Environnement (formerly SOGREAH) for the studies for rehabilitation/reconstruction of Zefta barrage.*

*Located in the delta of the Nile River, on the Damietta branch, Zefta barrage controls the water level of the upstream reach to irrigate via two main regulators more than 420 000 ha. Built in 1902 and remodelled in 1954 to secure the water supply, the barrage shows damages requiring the implementation of important works. Following the presentation of the options of rehabilitation and reconstruction of Zefta barrage, the Ministry decided to keep it in operating condition and thus to perform the detailed design of the rehabilitation option.*

*Rehabilitation studies required field investigations (underwater and visual inspection, bathymetry, drilling) in order to define as precisely as possible, the stresses affecting the barrage. Some of them necessitated important means and preparatory works as the construction of a 3.50 m high and 100 m long earthfill cofferdam. Results of the campaigns performed highlighted the heterogeneity of the quality of the constituting materials leading to design its strengthening works via suitable techniques (grouting of the structure).*

## 1. INTRODUCTION

Du fait de la rareté de la ressource en eau et de l'importance des barrages et régulateurs en Egypte, le Ministère Egyptien des Ressources en Eau et de l'Irrigation entreprend un vaste programme de réhabilitation/reconstruction des anciens ouvrages hydrauliques situés le long du Nil.

Après la reconstruction des barrages d'Esna, du Delta et tout récemment ceux de Naga Hammadi et d'Assiut (travaux en cours pour ce dernier), le Ministère Egyptien des Ressources en Eau et de l'Irrigation a mandaté le bureau d'étude ARTELIA Eau & Environnement pour la réalisation des études de réhabilitation/reconstruction du barrage de Zefta.

Le barrage de Zefta se situe sur le Nil sur la branche de Damiette à 100 km au Nord du Caire. Construit entre 1901 et 1903, il comporte 50 pertuis de 5 m de large, chacun équipé de 2 vannes glissières. Le barrage contrôle le niveau d'eau de deux prises d'eau principales installées sur chaque rive et construites à la même période : la prise d'eau de Mansouria (160 m<sup>3</sup>/s) sur la rive droite et la prise d'eau d'Abassi (280 m<sup>3</sup>/s) sur la rive gauche, le total irrigant 420 000 ha.

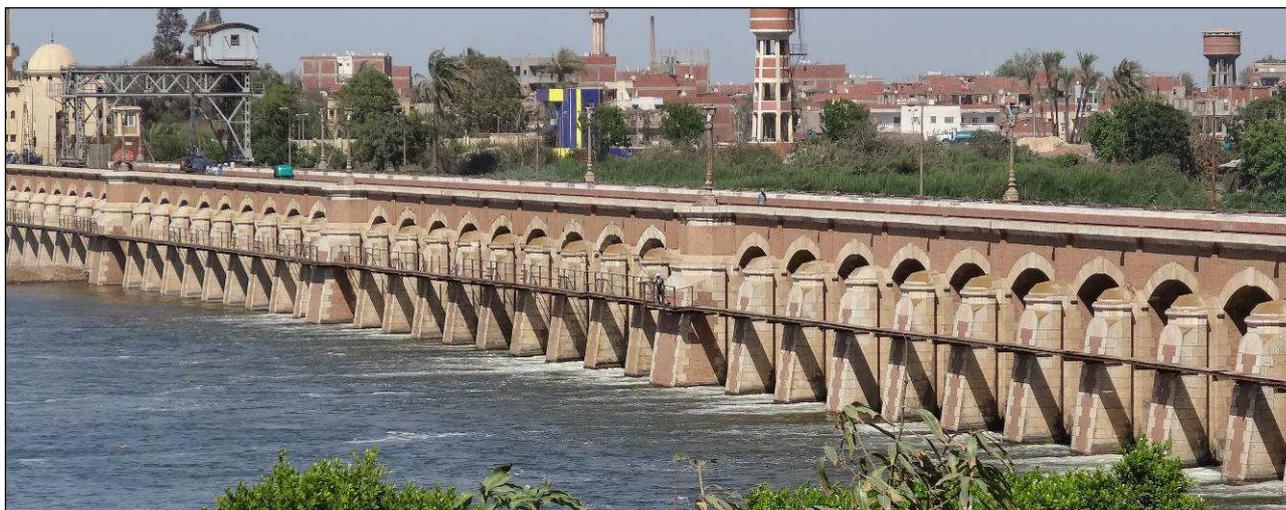
Les études se déroulent en 3 phases : l'avant-projet des options de reconstruction et de réhabilitation et, suite à la décision du Ministère, le projet et la rédaction des documents d'appel d'offres de l'option réhabilitation.

Le présent article traite principalement des investigations menées sur le barrage existant et des techniques de confortement améliorant la sécurité de l'ouvrage.

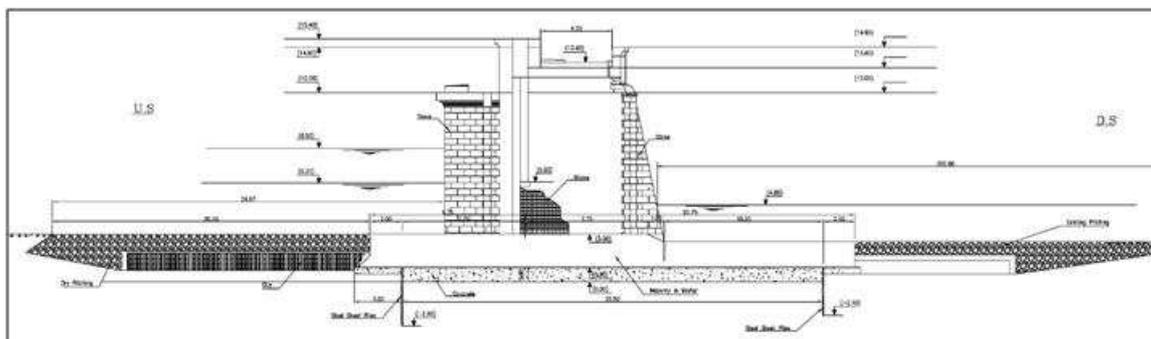
## 2. PRESENTATION DU BARRAGE DE ZEFTA

Le barrage de Zefta est un barrage mobile construit en brique qui comporte 50 pertuis de 5 m de large, chacun équipé de 2 vannes glissières. Il comporte deux écluses, une désaffectée en rive gauche et une nouvelle en rive droite dont la structure est indépendante du barrage. Quelques années après la construction du barrage, un seuil fixe a été construit environ 200 mètres à l'aval afin de pouvoir augmenter le niveau d'eau amont sans augmenter la charge sur le barrage. La charge maximale actuelle sur le barrage n'excède pas 4 m.

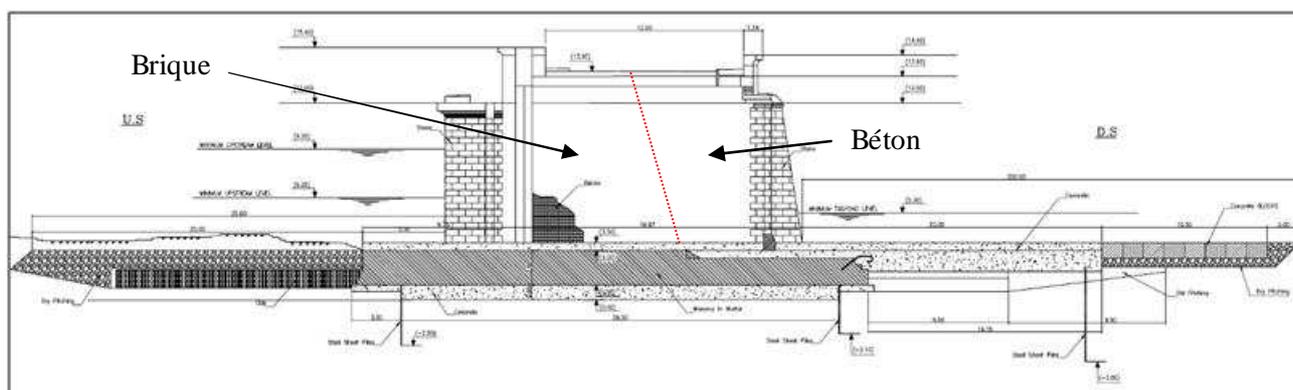
En 1952, d'importants travaux de confortement ont été réalisés sur le barrage permettant ainsi de sécuriser la demande en eau. Les travaux ont consisté en l'extension en béton des piles et du radier du barrage, en l'élargissement de la route située sur le barrage, au renouvellement des équipements mécaniques du barrage (portiques, vannes et pièces fixes) et au confortement du radier.



*Barrage de Zefta – Vue d'aval*



*Coupe type du barrage avant 1952 – Corps en brique*



*Coupe type du barrage après 1952 – Extension en béton*

### 3. HISTORIQUE DES ETUDES ET CAMPAGNES D'INVESTIGATIONS MENEES SUR LE BARRAGE

Plusieurs campagnes d'inspection et d'investigations géotechniques ont été réalisées au barrage de Zefta depuis 1980 dans le but de comprendre le comportement du barrage, dont l'apparition de fissures à la jonction brique/béton. Une campagne d'injections a même été réalisée dans ces fissures. De toutes ces campagnes seules quelques données sont encore disponibles.

Depuis 2004, Artelia Eau & Environnement (AEE, ex-SOGREAH) est mandaté par le Ministère Egyptien des Ressources en Eau et de l'Irrigation pour la réalisation des études de préfaisabilité (2004-2005) et de faisabilité (APS, APD, DAO, 2011-2013) de la réhabilitation/reconstruction du barrage de Zefta ainsi que des prises d'eau amont.

En 2012, suite à la remise du rapport d'Avant-Projet Sommaire (APS) des options de reconstruction et de réhabilitation du barrage de Zefta, le Ministère des Ressources en Eau et de l'Irrigation a opté pour la réhabilitation du barrage.

Les études menées par AEE ont conduit à la réalisation de différentes campagnes d'inspection visuelles et d'investigations dans le barrage et sa fondation: 2 campagnes d'inspection visuelle (2004 et 2011), 3 campagnes géotechniques (2004, 2011 et 2013), 2 campagnes topographiques (levés terrestres et bathymétriques en 2004 et 2011) et 2 campagnes d'inspection subaquatique (2004 et 2011). Ces campagnes sont détaillées dans la section suivante.

## 4. CAMPAGNES D'INVESTIGATIONS

### 4.1 Inspection visuelle du barrage

L'inspection visuelle de chaque pertuis du barrage a permis de révéler les défauts suivant :

- \* Altération des briques et des joints majoritairement situés dans l'ancienne partie du barrage,
- \* Fissuration du parement aval n'affectant que les briques en façade mais pas la structure,
- \* Altération des pierres calcaire de taille,
- \* Altération des enduits du parement amont.

Les deux campagnes d'inspection subaquatique ont permis de confirmer l'absence de défauts majeurs sur les parties immergées de la structure. La majorité des défauts rencontrés restent mineurs et concernent le béton du radier à proximité des vannes, érodé par l'écoulement de l'eau.

Cependant, dans la partie aval du radier (partie construit en 1952), les plongeurs ont signalé des fissures dont les photos et la cartographie n'ont pas permis dans un premier temps de déterminer leur origine. A la demande du Client, une inspection à sec et des sondages ont été réalisés dans le radier. Ces travaux sont abordés en détail dans la section 4.3.

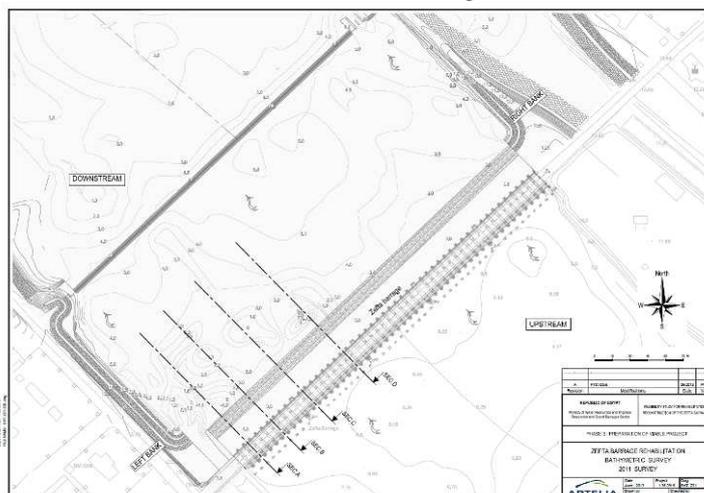


*Altérations / fissures*

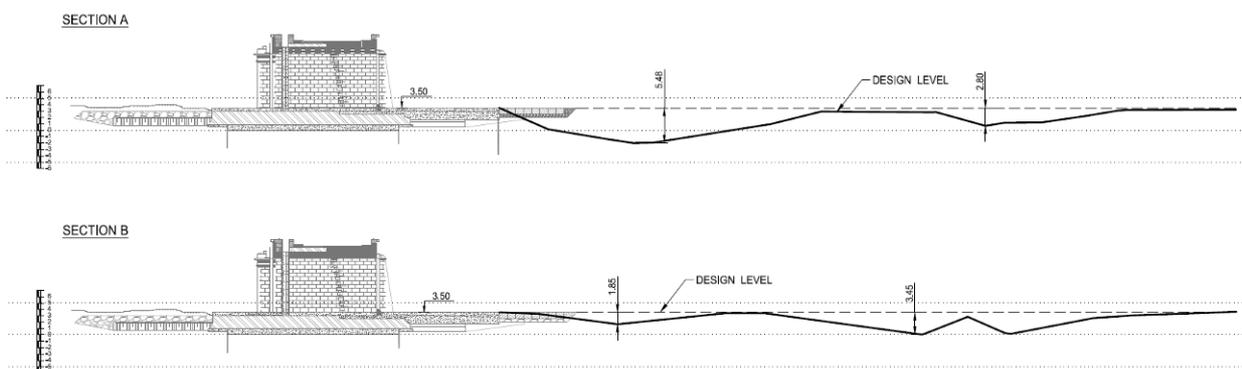
### 4.2 Levés bathymétriques

Les différents levés bathymétriques de la zone située entre le barrage et le seuil aval ont permis de déceler la présence d'importantes fosses d'érosion et d'en assurer le suivi. L'exploitation du barrage (ouverture préférentielle des vannes en rive gauche) serait à l'origine de ces fosses.

Ces fosses d'érosion représentent un risque en terme de stabilité du barrage, des protections contre l'affouillement font partie des travaux de réhabilitation du barrage.



*Vue en plan de la zone levée*



### 4.3 Campagnes d'investigations dans les piles du barrage

Plusieurs campagnes de sondages (1996, 2004, 2011 et 2013) ont été réalisées dans les piles du barrage et en fondation avec pour but de vérifier l'intégrité de la structure interne du barrage. Compte tenu du contexte du projet (Egypte) et des contraintes financières du client, les sondages ont dû être effectués en utilisant des techniques d'investigations disponibles localement : carottier simple (dont l'efficacité peut être discutable dans les maçonneries) ou double et en diamètre 64 ou 76 mm dans les parties en brique et en béton du barrage.

Les résultats obtenus durant les différentes campagnes sont regroupés dans le tableau suivant :

	Taux de récupération (%)	R Q D (%)	Densité (t/m <sup>3</sup> )	Résistance à la compression (MPa)
Béton				
Min.	39	0	1.9	5.86
Max.	100	100	2.34	37.1
Moy.	92.1	27	2.2	20.1
Brique				
Min.	20	0	1.6	1.59
Max.	100	100	1.83	12.7
Moy.	84.4	49.8	1.7	5.6
Radier (béton avec blocs calcaire)				
Min.	13	0	1.64	6.02
Max.	100	99	2.48	44.1
Moy.	81.3	37.3	2.3	20.1

Les résultats montrent que malgré des taux de récupération importants situés entre 80 et 90% en moyenne, les valeurs de RDQ sont faibles quel que soient les matériaux investigués. C'est dans le confortement en béton que l'on trouve la moyenne la plus basse avec moins de 30% de RQD puis dans le radier avec 37% et enfin dans la brique avec environ 50%.

Si ces résultats faibles peuvent en partie être imputés aux techniques de sondages et aux machines utilisées, on peut aussi présager que la structure présente des zones de faiblesses. En termes de résistance à la compression, les résultats sont en cohérence avec ceux habituellement rencontrés.

En 2004, un des sondages effectué dans la partie en béton du barrage a révélé la présence de matériaux sableux sans aucune trace de liant. La photo ci-dessous montre l'échantillon extrait :



*Sondage pile no 36*



*Echantillons extrait de la pile no 36*

Cet échantillon a été analysé en laboratoire afin de déterminer la nature des matériaux le composant. Selon le laboratoire, ce matériau lâche est composé essentiellement d'agrégats sans aucune trace de ciment sur leur surface et cette absence de cohésion ne serait pas le résultat d'une altération chimique. Ce type d'anomalie n'a été rencontré dans aucun autre sondage mais indique clairement que la structure du barrage peut montrer des signes de faiblesses inquiétants.

Au vu des faiblesses de la structure révélées par les sondages, il est nécessaire de venir lui redonner une cohésion d'ensemble et un comportement monolithique qui assurera une répartition homogène des charges hydrauliques.

Ce comportement monolithique peut être redonné au travers d'une campagne d'injection des piles et du radier qui permettra de combler les vides et d'apporter de la cohésion dans les zones ne comportant pas de liant.

#### **4.4 Inspection et sondages dans le radier aval du barrage**

L'inspection subaquatique de 2004 a mis en évidence la présence de fissures dans le radier à l'aval du barrage, difficiles à cartographier et photographier à cause de la turbidité de l'eau et de la présence de sédiments. Leur origine exacte n'était donc pas totalement déterminée. Le Ministère des Ressources en Eau et de l'Irrigation a donc voulu poursuivre l'identification de ces fissures, en connaître la profondeur, et vérifier la présence ou non d'éventuels écoulements au travers. Une nouvelle campagne d'inspection à sec du radier a donc été lancée.

Ces fissures sont situées en dehors des batardeaux de maintenance du barrage. La mise à sec de la zone a nécessité la construction d'un batardeau de chantier. Pour des raisons économiques, l'inspection du radier n'a été effectuée que sur une partie située en rive droite.

Le batardeau, d'une hauteur de 3.5m et d'une longueur d'environ 100 m, a été construit en remblai avec les matériaux disponibles sur le site (sable fin + silt). Des essais en laboratoire et une modélisation du batardeau (écoulement interne et stabilité) ont permis de confirmer sa stabilité et son étanchéité évitant ainsi l'installation d'une paroi étanche.

La construction du batardeau a commencé depuis la rive droite en versant le matériau directement dans le lit du Nil et s'est terminée devant le pertuis no 42.



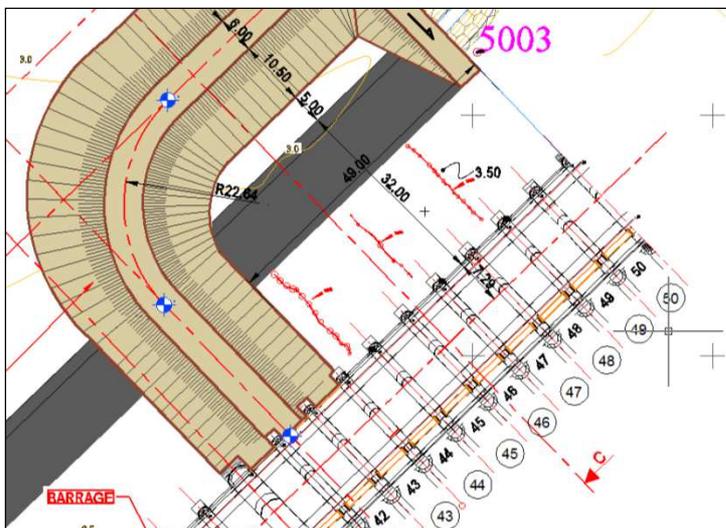
*Construction du batardeau – vue depuis la rive droite*

En parallèle, des drains ont été percés depuis une barge dans le radier afin de réduire les sous pressions et d'éviter le soulèvement de ce dernier lors de la vidange du batardeau.

Une fois le radier mis à sec par pompage, les fissures ont été identifiées. Au nombre de trois, des sondages au carottier double ont été forés à leur aplomb.



*Mis à sec du batardeau et démarrage des sondages dans les fissures*



*Position (en rouge) et aspect des fissures identifiées*

L'espacement régulier entre les fissures (env. 14m), leur verticalité, l'absence de joint de construction et de décalage dû à des tassements différentiels amènent à penser que le retrait du béton en serait l'origine. Les fissures contournent les agrégats du fait de leur résistance en traction supérieure à celle de la pâte de ciment. Aucun écoulement n'a été perçu au travers de ces fissures.

Ces fissures ne présentant pas de risque vis-à-vis de la sécurité du barrage, il a été décidé de ne leur prévoir aucun traitement spécial lors des travaux de réhabilitation du barrage.

## 5. TRAVAUX DE REHABILITATION PRECONISES

### 5.1 Réparations des parements du barrage

Les réparations des parements du barrage concerneront :

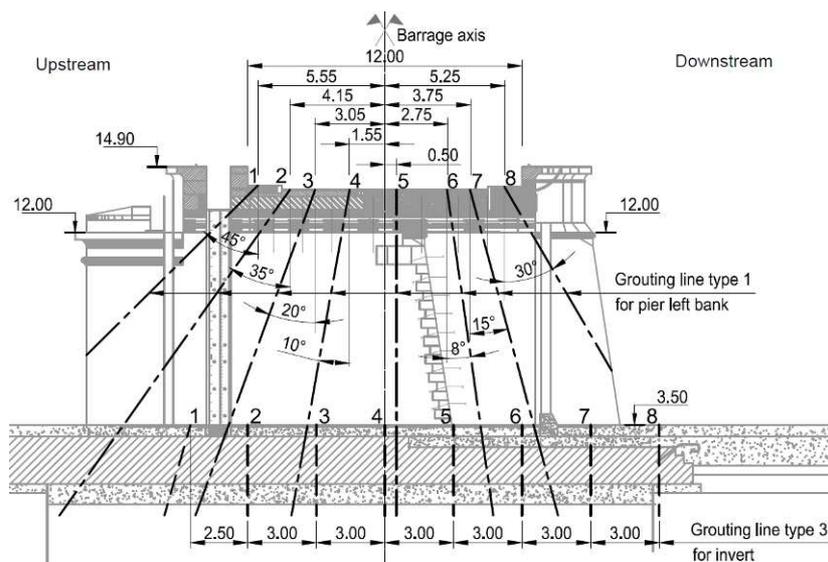
- \* les surfaces des piles, où les briques endommagées seront remplacées,
- \* les pierres de taille, lorsque celles-ci présentent des faces altérées ou érodées,
- \* la surface du radier, où la surface érodée sera recouverte d'une chape en béton anti-abrasion,
- \* les faces amont, où le revêtement posé en 1952 sera remplacé,
- \* les faces aval, où les fissures ouvertes seront traitées, les briques et les pierres de parement fissurées ou altérées remplacées,

En plus de l'aspect architectural, les travaux de réparation des parements sont nécessaires pour la réalisation des travaux d'injection, évitant ainsi le risque de fuite du coulis.

### 5.2 Travaux de consolidation

La consolidation de la structure sera réalisée par une injection systématique des piles et du radier du barrage, ainsi que des murs guideaux et des murs de l'ancienne écluse. La consolidation des piles sera réalisée par injection de coulis de ciment après réparation des parements endommagés lorsque nécessaire, à partir de trous verticaux forés depuis la surface du pont en commençant par le bas des piles. L'injection du radier sera réalisée à partir de trous verticaux forés depuis la surface du radier, en même temps que l'injection du contact entre la fondation et la sous-face du radier. Au stade des études, la pression maximale d'injection dans la structure est fixée à 300 kPa et sera confirmée, tout comme la composition du coulis, durant la réalisation des planches d'essais.

Le schéma ci-dessous indique l'implantation des forages d'injection dans une pile du barrage.



*Principe d'injections d'une pile et du radier*

### 5.3 Réparation de la protection à l'aval du barrage

Les blocs de protection déplacés seront enlevés, les couches de filtre remplacées avec des matériaux de granulométrie adéquate, et remis en position correcte. Les fosses d'érosion observées dans le bassin aval seront remplies à la cote normale du lit, soit avec un matériau de granulométrie suffisante pour résister à l'érosion due à l'écoulement venant du barrage, soit avec des alluvions sableuses ordinaires recouvertes par un couche de protection dont l'épaisseur et la granulométrie diminuent d'amont en aval.

### 5.4 Rénovation des équipements mécaniques

La totalité des vannes du barrage seront démontées, sablées et repeintes. Des mesures d'épaisseur d'acier seront systématiquement faites afin d'identifier les zones potentielles à conforter suite à une perte trop importante de matière. Si besoin, les vannes trop abîmées seront remplacées par des neuves. Les pièces fixes ne seront pas démontées du fait de leur intégration dans la maçonnerie ancienne du barrage. Elles seront sablées, renforcées au niveau de la zone de roulement des galets et repeintes. Les portiques de levage seront remplacés de manière à améliorer et sécuriser l'exploitation du barrage.

### 5.5 Réhabilitation du seuil à l'aval

Le seuil aval sera réhabilité de manière à :

- \* Remettre en état la surface du seuil, qui est faite de blocs maçonnés qui présentent des zones étendues profondément endommagées ou érodées,
- \* Compléter le profil du seuil et de sa protection aval pour l'ajuster aux nouvelles conditions aval de la rivière résultant du dragage du lit,
- \* Injecter l'intérieur du seuil pour assurer un comportement monolithique de la structure.

## 6. CONCLUSIONS

De tous les grands barrages égyptiens, Zefta sera probablement le seul à être conservé. Malgré les difficultés d'exploitation liées au nombre de vannes et les incertitudes sur la qualité des matériaux le constituant, le Ministère des Ressources en Eau et de l'Irrigation a souhaité continuer son exploitation pendant les prochaines décennies.

C'est dans cet optique que les différentes campagnes d'investigations réalisées sur le barrage ont permis de cibler au mieux les défauts de la structure et de mettre en place des techniques de réhabilitation adaptées à la structure ancienne. Compte tenu du contexte du projet et des contraintes financières du client, les techniques d'investigations utilisées restent des techniques classiques (les seules disponibles en Egypte) mais ont quand même nécessité la mise en œuvre de moyens importants notamment la réalisation du batardeau.

A ce jour, les dimensions du barrage de Zefta ont fait que sa structure n'a pu être entièrement investiguée. Il reste encore un certain nombre de piles dont l'état de structure interne reste inconnu. Cependant, l'hétérogénéité de la qualité des matériaux constitutifs a bien été identifiée et cela a permis de prévoir des moyens efficaces de confortement. Ainsi, les résultats obtenus par l'investissement lourd que représentent ces investigations démontrent l'intérêt de procéder en temps voulu aux investigations nécessaires pour permettre de cadrer et d'optimiser le programme d'une opération de telle envergure.

## 7. REMERCIEMENTS

Remerciements à Ing. Ibrahim Abu Naga, chef du Département Central d'Etudes et Spécifications, Secteur Grands Barrages et Réservoirs du Ministère des Ressources en Eau et de l'Irrigation ainsi qu'à son équipe de projet, pour leur expérience apportée durant ce projet.