



**HAL**  
open science

## Investigations en fondation et études de diagnostic pour le confortement du barrage de Dardennes

K. Laliche, R. Venier, G. Degoutte, P. Meriaux, B. Patouillet, J. Bailleul

► **To cite this version:**

K. Laliche, R. Venier, G. Degoutte, P. Meriaux, B. Patouillet, et al.. Investigations en fondation et études de diagnostic pour le confortement du barrage de Dardennes. Colloque CFBR “ Fondations des barrages : caractérisation, traitements, surveillance, réhabilitation ”, Apr 2015, Chambéry, France. pp.47-58. hal-01301631

**HAL Id: hal-01301631**

**<https://hal.science/hal-01301631>**

Submitted on 12 Apr 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## INVESTIGATIONS EN FONDATION ET ETUDES DE DIAGNOSTIC POUR LE CONFORTEMENT DU BARRAGE DE DARDENNES

### *Dardennes dam: foundation investigations and diagnosis before reinforcement studies*

**Katia LALICHE**

Société du Canal de Provence  
Le Tholonet, CS 70064, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5  
[katia.laliche@canal-de-provence.com](mailto:katia.laliche@canal-de-provence.com)

**Gérard DEGOUTTE**

Membre du CTPBOH

**Bruno PATOUILLET**

DREAL

16 rue Antoine Zattara, CS70248, 13331 Marseille Cedex 03  
[bruno.patouillet@developpement-durable.gouv.fr](mailto:bruno.patouillet@developpement-durable.gouv.fr)

**Romain VENIER**

Tractebel Engineering S.A.  
129 rue Servient 69326 Lyon Cedex 3  
[romain.venier@gdfsuez.com](mailto:romain.venier@gdfsuez.com)

**Patrice MERIAUX**

Irstea

CS 40061 13182 Aix-en-Provence Cedex 5  
[patrice.meriaux@irstea.fr](mailto:patrice.meriaux@irstea.fr)

**Joëlle BAILLEUL**

Ville de Toulon

137 rue Henri Poincaré, 83000 Toulon  
[jbailleul@mairie-toulon.fr](mailto:jbailleul@mairie-toulon.fr)

### MOTS CLÉS

Barrage en maçonnerie, rideau de drainage de la fondation, sous-pressions en fondation, auscultation, confortement.

### RÉSUMÉ

*Investigations en fondation et études de diagnostic pour le confortement du barrage de Dardennes.*

*Le barrage de Dardennes vient de fêter ses 100 ans. C'est un ouvrage poids arché, en maçonnerie de 35 m de hauteur, dont la retenue, d'une capacité d'environ 1 hm<sup>3</sup> permet de stocker les excédents de la source du Ragas afin de sécuriser l'alimentation en eau de la ville de Toulon, située juste en aval. L'ouvrage présente aujourd'hui un évacuateur de crues sous-dimensionné au regard des standards actuels, et des niveaux de fuites et de sous-pressions qui ont conduit le Service de Contrôle de Sécurité des Ouvrages Hydrauliques appuyé par Irstea, à prescrire un diagnostic sur les garanties de sûreté pour ce barrage. Les études et investigations nécessaires à ce diagnostic ont dès lors été engagées, sous la maîtrise d'ouvrage de la Ville de Toulon et la direction d'un consortium de deux bureaux d'études agréés, la Société du Canal de Provence et Tractebel Engineering – Coyne et Bellier. Les reconnaissances géotechniques réalisées fin 2012 – début 2013 pour reconnaître la nature de l'assise du barrage ont permis de valider certaines hypothèses géotechniques et d'affiner le calcul de stabilité du barrage. Toutefois, les incidents intervenus pendant les travaux du fait de la complexité géologique du site ont conduit en premier lieu à adapter le programme, puis à modifier fondamentalement le projet de confortement par injection en fondation initialement imaginé. Les études de diagnostic ont finalement abouti à proposer la mise en place d'une recharge en pied aval du barrage.*

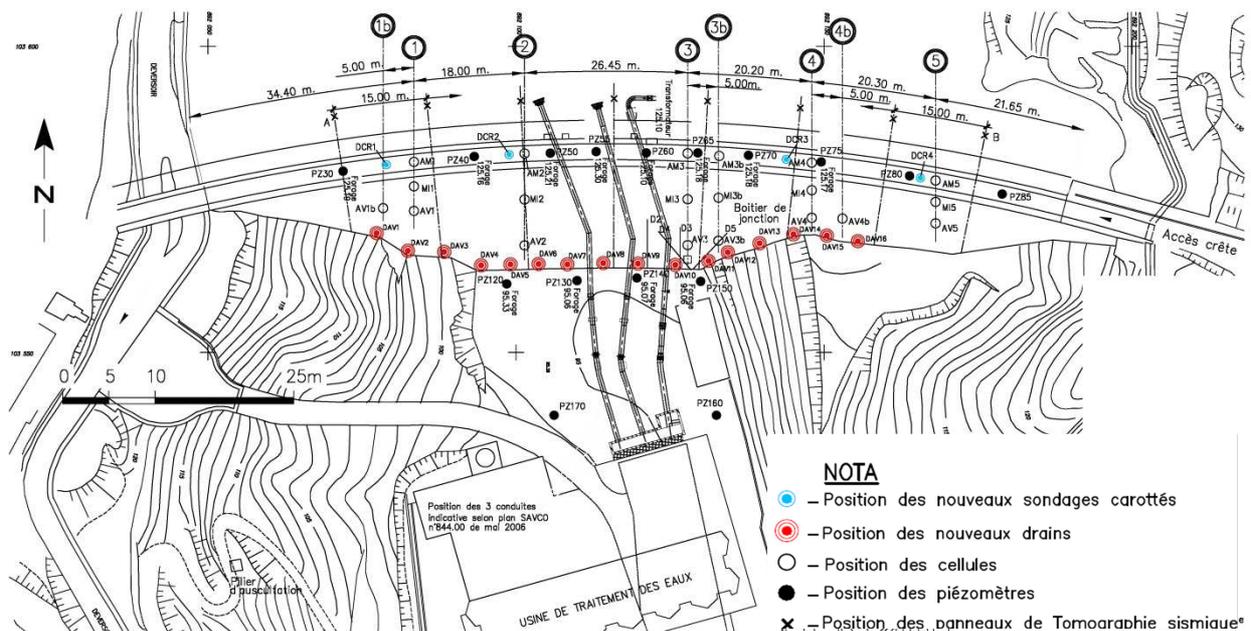
### ABSTRACT

*The Dardennes dam has just celebrated its 100th anniversary. It's a gravity arched dam, made out of masonry, 35 m high. Its reserve, about 1 hm<sup>3</sup> of capacity, is fed by the overflows of the spring called the Ragas, and supplies water to the city of Toulon downstream. The spillway of the dam is now undersized as regards the new French standards. In addition, the significant dam leaks and measured under-pressures in its foundation have led the State Service for the control of the safety of hydraulic structures to prescribe a complete diagnosis regarding the dam safety. The studies and necessary investigations for diagnosis have been engaged by the city of Toulon. A consortium of two engineering companies, the Society of Canal de Provence and Tractebel Engineering – Coyne et Belier is in charge of the project. The 2012 – 2013 geotechnical investigations engaged in order to recognize the main mechanical characteristics of the foundation enabled to validate geotechnical assumptions, and to provide the necessary data for a precise stability analysis. Nevertheless, the incidents that occurred during the geotechnical investigation works, because of the complex geological context, have led firstly to adapt the initial investigation program and secondly to amend the project as initially designed, reinjection of the rock foundation. Today, the project has evolved into a dam reinforcement with a downstream foot bank.*

## 1. INTRODUCTION

Le Barrage de Dardennes est un barrage en maçonnerie de 36 m de hauteur, construit en 1912 pour emmagasiner les excédents de la source vaclusienne du Ragas, dont les débits sont très variables et ponctuellement très importants, afin de les restituer pour sécuriser l'alimentation de Toulon.

En 2010, les résultats de la surveillance du barrage de Dardennes ainsi que les études de stabilité et hydrogéologiques indiquent que les garanties de sûreté de l'ouvrage ne sont pas suffisantes. Le Maître d'Ouvrage missionne alors un consortium de Bureaux d'études – l'ingénierie de la Société du Canal de Provence et Coyne et Bellier - pour entreprendre les études de projet pour le confortement de cet ouvrage. Les incidents rencontrés lors de l'exécution d'un rideau de drainage et des reconnaissances géotechniques vont remettre en cause le projet initial de mise en œuvre d'un confortement par injections de la fondation.



Graphique 1: Vue d'ensemble de l'ouvrage - Implantation des reconnaissances géotechniques (novembre 2012)

## 2. HISTORIQUE DE LA CONSTRUCTION ET DE L'EXPLOITATION

### 2.1 Contexte géologique de l'aménagement

Le barrage de Dardennes est situé sur l'extrémité orientale d'une vaste structure synclinale appelée « Synclinal de Beausset ». Le cœur de cette structure est occupé par des formations de la fin du Crétacé : Cénomaniens, Turoniens et Campaniens. Ces terrains sont moyennement perméables (argilo-gréseux), voire marneux (Cénomaniens marneux, Turoniens marneux).

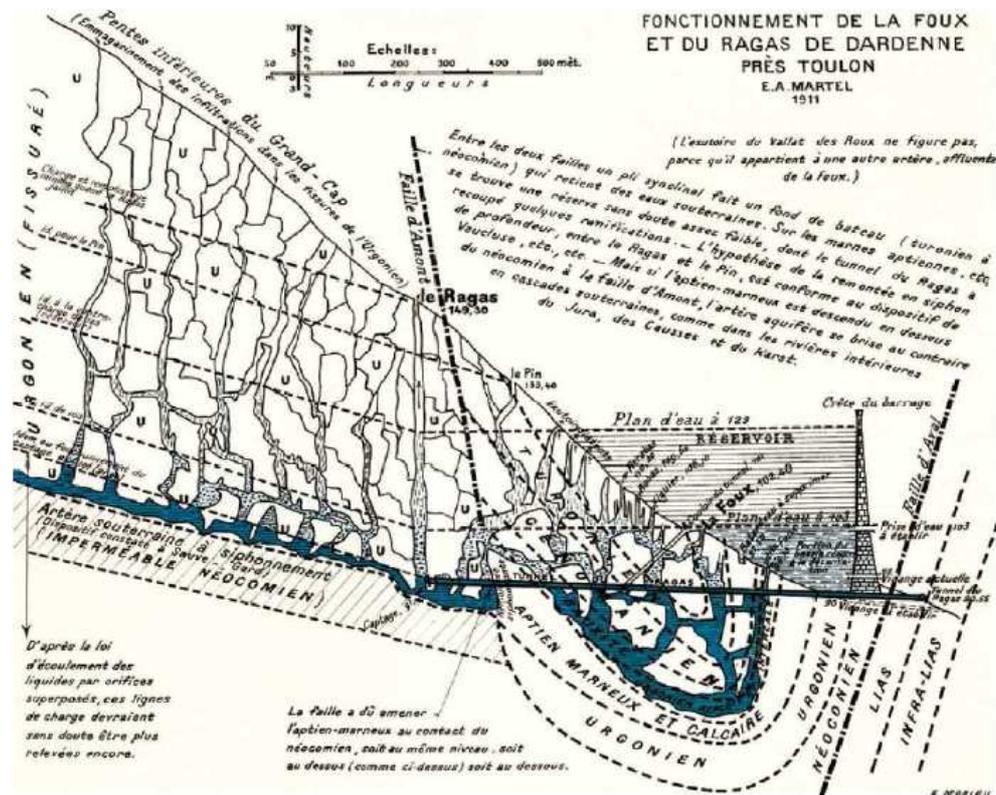
Plus en profondeur, entre l'Aptien / Turonien marneux d'une part, et le Néocomien d'autre part, on rencontre les calcaires urgoniens, intensément karstifiés et constituant le plateau du Siou Blanc. Avec les dolomies jurassiques sous-jacentes, également karstifiées, qui reposent sur des marnes bathoniennes, ces deux formations aquifères constituent des réservoirs de première importance régionale qui donnent naissance à un certain nombre de sources (exurgences de Dardennes, sources de la vallée du Gapeau et, à l'opposé de la structure synclinale, sources sous-marines de Cassis et Port-Miou).

Le barrage a été établi sur une géologie très tourmentée, qui comporte à la fois des zones imperméables et des zones perméables et fissurées. L'emplacement de l'ouvrage a été déterminé par les considérations géologiques : de longues études, de nombreux sondages de reconnaissance ont été menés dans les années 1900. Le concepteur a pris le pari, osé mais réussi, d'implanter la retenue sur ce synclinal pincé entre deux failles, référencé aussi comme « le pli du Revest » (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Le fond de la cuvette est constitué par une couche pratiquement imperméable de marnes néocomiennes (ou dernier étage du Crétacé), surmontée par le prolongement en profondeur du banc urgonien fissuré qui recouvre le plateau, lui-même surmonté de plusieurs couches épaisses du Crétacé, plus ou moins imperméables :

- marnes aptiennes,
- marnes et calcaires cénomaniens,
- calcaire karstique turonien.

Au droit du barrage, les pendages dirigés vers amont sont favorables en termes d'étanchéité et de stabilité.



**Graphique 2:** Coupe en long géologique de la vallée de Dardennes ; fonctionnement de la Foux et du Ragas de Dardennes à Toulon (établie par E. A. MARTEL, 1911, et reproduite dans l'article de 1914 publié après la construction de l'ouvrage [5]).

En rive droite et en fond de vallée, le barrage est fondé directement sur la barre de calcaire urgonien. En rive gauche, les différents documents disponibles laissent supposer que le barrage a été descendu à travers le massif d'éboulis jusqu'à 24 m de profondeur pour atteindre les marnes aptiennes, sous la forme d'un « masque »<sup>1</sup> de chaux maritime de 2,1 m d'épaisseur et de 175 m de longueur. La profondeur atteinte représente 5 m de plus que prévu initialement dans le projet. Cet écran constituait à l'époque la plus grande originalité de cet aménagement et sa plus grande difficulté.

## 2.2. Reconnaissances et traitement de la fondation

Pendant les travaux (mars 1910), quelques fissures sont découvertes sur le fond de fouille dans les bancs de calcaire urgonien, en particulier deux fissures remplies d'argile, perpendiculaires à l'axe du barrage. Mais leur nature ne semble pas inquiéter le Maître d'Œuvre qui préconise simplement de traiter la partie superficielle accessible des fissures avec de la chaux maritime [1].

Des injections superficielles sous faible pression ont été réalisées en cours de construction (avril-mai 1910), pour combler les fissures découvertes sur le fond de fouille du barrage.

<sup>1</sup> On parlerait aujourd'hui plutôt d'un écran ou d'une paroi puisqu'il s'agit d'une partie d'ouvrage creusée dans le terrain.

Au cours des premières mises en eau de l'ouvrage en mars 1912, des fuites jugées anormales sont constatées sous le barrage. Des injections sous pression sont alors réalisées depuis les pieds amont et aval de l'ouvrage, dans des trous de 4 à 8 m de profondeur creusés à la barre à mine. Il est à noter que, pendant cette campagne, pratiquement aucune injection n'a été réalisée en rive gauche, ce qui semble confirmer l'absence d'éboulis sous le barrage. Le remplissage complet de la retenue n'interviendra qu'en avril 1913.

Au cours de la vie de l'ouvrage, divers désordres (fuites de débit croissant, résurgences aval, piézométrie élevée) ont conduit à entreprendre plusieurs campagnes de reconnaissance.

Les forages successifs ont permis de reconnaître l'état de la maçonnerie et de la fondation et de préciser par endroits la cote du contact barrage/fondation. Ils ont ensuite été utilisés pour injecter la maçonnerie et sa fondation proche, ou pour installer des dispositifs d'auscultation.

On notera en particulier, la pose en deux étapes (1989 et 1997) au contact barrage-fondation de 20 cellules de pression interstitielle à corde vibrante suivant trois profils comportant chacun trois cellules : en amont, à mi-largeur et en aval.

### **2.3 Perte des garanties de sûreté**

En 2010, Irstea en appui au Service de Contrôle des Sécurité des Ouvrages Hydrauliques établit au vu des résultats d'auscultation que le bénéfice des travaux antérieurs d'injection et de drainage est désormais annihilé [2]. Les fuites et les sous-pressions ont peu à peu dépassé les valeurs avant injections et continuent à augmenter inexorablement [6].

Parallèlement, les vérifications de stabilité, certes basées sur un faible nombre d'essais mécaniques, indiquent la faible marge de sécurité de l'ouvrage.

Concernant les crues, plusieurs études hydrologiques convergent vers la conclusion que le système d'évacuation des crues du barrage est insuffisamment dimensionné vis-à-vis des critères modernes de calcul et que l'ouvrage n'est pas sûr en cas de crues exceptionnelles. Ces études précisent également que le nouvel évacuateur doit être dimensionné en tenant compte du comportement du bassin versant hydrogéologique, encore méconnu.

Sur proposition du Service de Contrôle des Sécurité des Ouvrages Hydrauliques, ces éléments ont conduit à l'arrêté préfectoral du 5 juillet 2011 : il est prescrit un diagnostic sur les garanties de sûreté (« révision spéciale ») pour ce barrage, diagnostic à appuyer sur des reconnaissances du barrage et de sa fondation ainsi que sur une étude hydrogéologique. En urgence, il a été demandé de supprimer le parapet étanche rajouté en 1978 afin d'améliorer dans un délai très court la stabilité en cas de forte crue, ce qui a été fait en septembre et octobre 2011.

## **3. RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES ET DRAINAGE**

En 2011, les documents existants relatifs au barrage ne permettent pas de définir avec précision le matériau constitutif du barrage ainsi que le positionnement et la nature du contact barrage fondation. De nouvelles reconnaissances sont nécessaires préalablement aux études de diagnostic. Elles se sont déroulées entre novembre 2012 et avril 2013.

### **3.1 Programme initial**

Le programme initial de ces reconnaissances supplémentaires a été établi pour répondre aux objectifs suivants :

- valider la géométrie du barrage et en particulier son contact avec la fondation ;
- valider les paramètres géotechniques de la maçonnerie et du rocher de fondation nécessaires aux calculs de stabilité ;
- déterminer les modules d'élasticité du barrage (maçonnerie) et du rocher de fondation ;

- effectuer des essais de perméabilité (essais d'eau sous pression limitée à 2 bars) dans le corps du barrage et de la fondation rocheuse sur une profondeur suffisante en vue d'une possible campagne d'injection ;
- installer des drains en pied aval du barrage et ainsi réduire la piézométrie en cet emplacement.

Il était initialement prévu la réalisation des travaux suivants :

- quatre sondages carottés verticaux de 60 ml environ depuis la crête du barrage ; équipement en piézomètres de ces quatre sondages;
- seize sondages carottés inclinés vers l'amont, de 10 à 20 ml réalisés depuis le pied aval ; équipement de ces sondages en drains;
- essais d'eau sous pression et essais au dilatomètre ;
- une campagne de tomographie sismique depuis les parements amont et aval de l'ouvrage ;
- essais de laboratoire sur des échantillons de maçonnerie et de rocher de fondation : poids spécifique, compression uniaxiale avec détermination du module tangent, essais brésiliens, porosité, vitesse de propagation des ondes, essais triaxiaux non drainés avec mesure de la pression interstitielle dans la maçonnerie et dans la fondation rocheuse.

### 3.2 Suivi des travaux

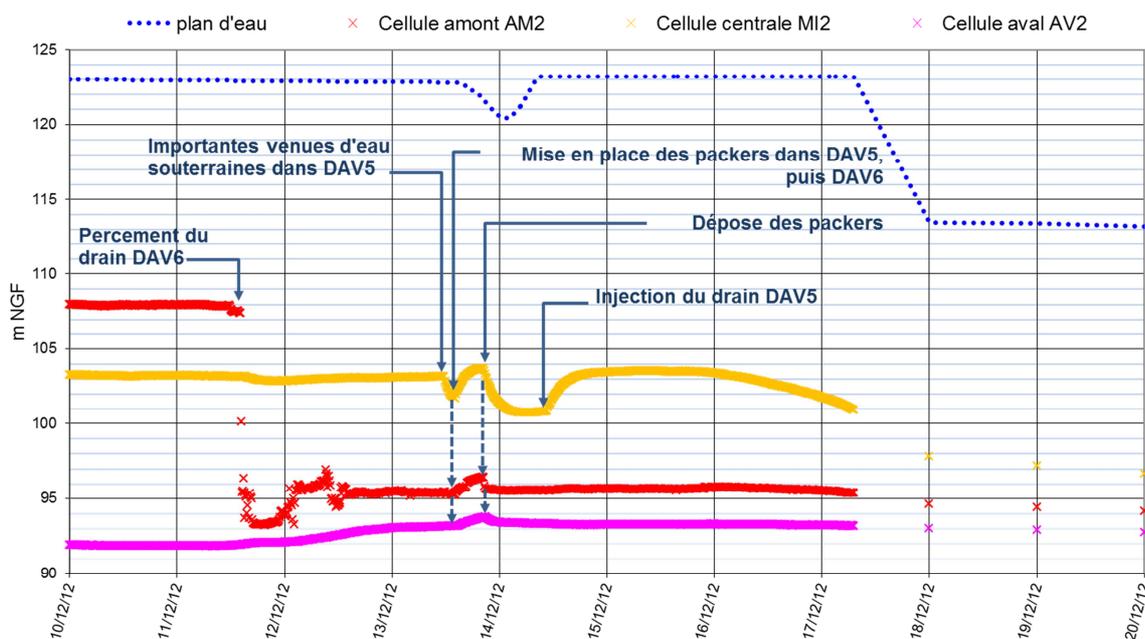
Les travaux se sont accompagnés d'un suivi permanent des instruments d'auscultation notamment des piézomètres situés à l'aval et dans le corps du barrage, ainsi que des cellules de pression interstitielle situées au contact rocher/fondation.

Les essais d'eau ont rapidement été interrompus du fait de fortes fuites d'eau nouvelles apparues dans le corps du barrage.

Le déroulement des travaux a de plus été perturbé par un incident survenu suite au percement d'un drain en rive droite (drain dit DAV5), au pied aval, le 13 décembre 2012. En effet, quelques heures après avoir atteint la profondeur prévue, une importante venue d'eau chargée de matière en suspension est constatée. Elle atteint un débit estimé à 20 m<sup>3</sup>/h. L'entreprise se trouve face à des difficultés ne lui permettant pas de reboucher le drain rapidement. Un packer est alors placé à l'aval du forage ; relié à une manchette pompier, ce dispositif permet de canaliser l'eau pour que la plate-forme de travail ne soit pas inondée. Un dispositif identique est placé sur le drain voisin (DAV6) qui s'est également mis à couler à la suite de la mise en place du premier packer.

Craignant un lessivage de la maçonnerie et une augmentation des sous-pressions, une cellule de crise spécialisée réunissant le Maître d'Ouvrage, l'exploitant et l'ingénierie-conseil est très rapidement mise en place dans les heures qui suivent, et l'exploitant met en œuvre une surveillance 24h/24h de l'ouvrage.

Dans la soirée suivant l'événement et grâce au suivi en continu des piézomètres, il est constaté une augmentation des sous-pressions en fondation. L'entreprise est immédiatement rappelée sur site pour déposer les packers. Cette opération permet effectivement de retrouver un niveau piézométrique sous l'ouvrage identique à celui observé avant la mise en place des packers.



**Graphique 3:** Suivi piézométrique en fondation – Profil 2 – Zoom sur l'événement du 13 décembre 2012

Parallèlement et afin notamment d'épuiser les venues d'eau dans les drains aval, il est demandé à l'exploitant de procéder à une rapide baisse du plan d'eau qui ne sera effective que quatre jours plus tard du fait de l'alimentation de la retenue par de fortes précipitations.

Malgré cela, le fond du forage est injecté le lendemain de l'événement.

S'il est normal que les drains débitent, car ils constituent une première mesure de mise en sécurité de l'ouvrage en faisant chuter rapidement les sous-pressions en fondation, de trop forts débits, s'ils concernent le corps du barrage, pourraient à terme détériorer la maçonnerie.

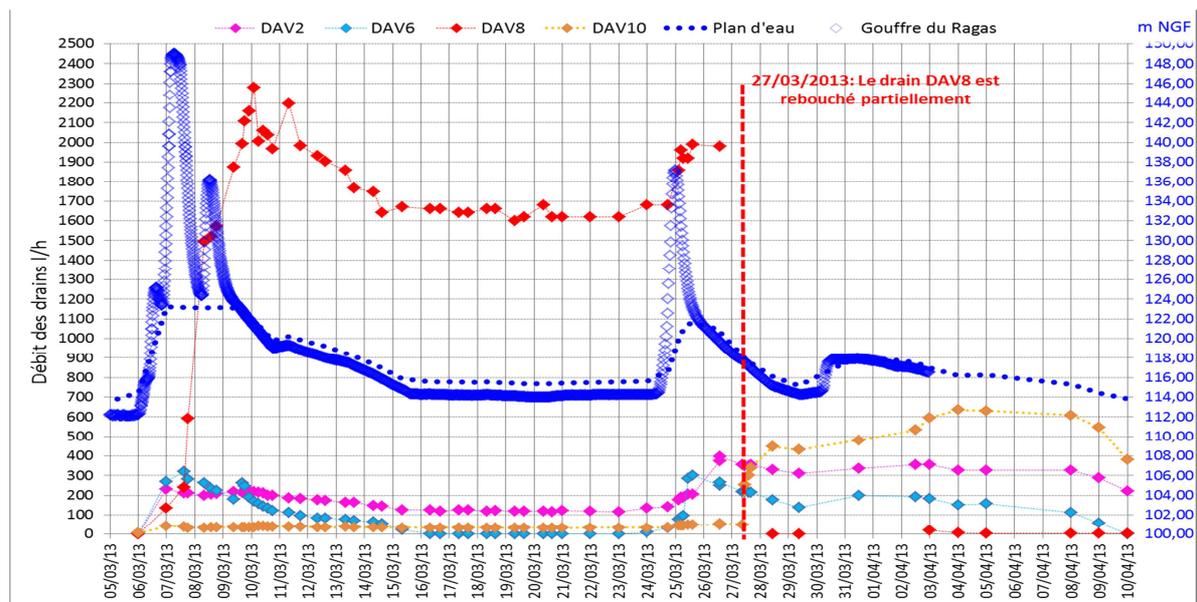
Suite à l'incident, une campagne d'imagerie optique des drains a été réalisée pour déterminer les caractéristiques et orientations des fissures et discontinuités de la fondation rocheuse, et observer l'état de la maçonnerie.

### 3.3 Résultats de la campagne de reconnaissances

#### 3.3.1 Amélioration de la connaissance de l'hydrogéologie du site

Dans le cadre de la surveillance du barrage, encore renforcée suite à l'événement décrit plus haut, des corrélations ont pu clairement être établies entre le niveau d'eau dans le gouffre du Ragas qui alimente la retenue (cf. graphique 3), le plan d'eau et le débit des drains.

- sous l'effet de la hausse du niveau d'eau dans le gouffre du Ragas due à de fortes pluies, certains débits de drainage ont soudainement augmenté de manière exponentielle ;
- après un retour à la normale du niveau d'eau dans le gouffre du Ragas, les débits de drainage se maintiennent relativement hauts. ;
- le débit drainé par le drain DAV8 est jugé anormalement élevé. Il a donc été rebouché le 27 mars 2013 provoquant une hausse des débits drainés par les drains voisins.



**Graphique 4 :** Corrélation entre la cote du niveau d'eau dans le gouffre du Ragas, la cote du plan d'eau et les débits des nouveaux drains

Ces observations montrent que le réseau de fissures du massif de fondation du barrage est en lien avec le niveau de la retenue elle-même alimentée par le gouffre du Ragas. La réalisation de drains qui ont recoupé ce réseau a provoqué un déboufrage des fissures colmatées d'argile sous l'effet de la mise en charge du gouffre du Ragas.

L'inspection caméra réalisée le 14 mars 2013 révèle en effet que DAV8 est obstrué par du sable à partir de -9,50 m de profondeur sous le parement. Il avait été foré jusqu'à -13,25 m de profondeur.

Un déboufrage de ce type est également constaté au niveau de DAV6 qui a vu son débit tripler le lendemain de la montée du niveau du Ragas le 24 mars 2013, malgré une cote de plan d'eau inférieure à celle du 7 mars 2013.

L'inspection vidéo des drains montrent que ceux présentant des débits ont systématiquement recoupé une fissure contrairement à ceux qui ne coulent pas.

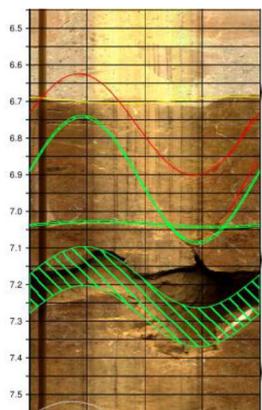
Compte-tenu de la connaissance acquise sur le fonctionnement hydrogéologique de la fondation du barrage et préalablement à la remontée du plan d'eau, les drains ayant traversé une fissure ont été rebouchés partiellement (c'est-à-dire du fond du forage jusqu'au-dessus de la ou des fissures constatées), qu'ils débitent ou non. Ce rebouchage préventif a été décidé afin d'éviter de nouveaux débouffrages qui auraient pu conduire à de trop forts débits de drainage à travers la maçonnerie, qui auraient pu survenir avec la remontée du plan d'eau. Ainsi, 12 des 16 drains ont été rebouchés.

### 3.3.2 Caractéristiques de la fondation et de la maçonnerie

Contrairement à ce que laissent supposer les documents d'archives, la récente campagne de sondage a permis de constater que les calcaires de l'Urgonien constituent de manière homogène la fondation de l'ouvrage.

Le contact maçonnerie/fondation est qualifié de bon : il est bien fermé, avec une cohésion non nulle.

Les premiers cinquante centimètres de fondation sous le contact apparaissent assez fracturés : fissures ouvertes centimétriques à pluri-décimétriques et fissures remplies de matériaux fins. Le réseau de fissures présente une organisation structurale complexe démontrée par la grande dispersivité sur le canevas de Wulff et ce malgré un substratum stratifié. Ceci est attribué à la structure globale en synclinal et à la faille aval [3].



**Graphique 5:** Exemple de fissure colmatée sous le contact avec la fondation et de fissure ouverte en fondation



La tomographie sismique a, quant à elle, permis de constater l'absence d'hétérogénéité dans le corps du barrage et une bonne qualité mécanique du massif calcaire de fondation.

#### **4. PHASE DE DIAGNOSTIC ET ORIENTATIONS RETENUES POUR LA PHASE PROJET**

La campagne de reconnaissances géotechniques, si elle n'a pas permis de lever de façon exhaustive les incertitudes dans la connaissance de la fondation, a toutefois apporté de précieux enseignements pour la phase de diagnostic de confortement par rapport aux seuls éléments à disposition dans les archives de l'ouvrage :

- la fondation proche de l'ouvrage est concernée par un réseau de fissures dont les orientations sont très disparates ;
- il a été confirmé que le fonctionnement des circulations d'eau dans la fondation fissurée est très difficile à appréhender de façon précise. Un lien est toutefois établi entre ces circulations d'eau et le niveau de saturation du réseau karstique amont (gouffre du Ragas), engageant à la prudence quant aux dispositions constructives d'un drainage aval, dans le contexte de la perte d'étanchéité des anciens ouvrages d'injection de la fondation ;
- malgré les risques de débouillage que le forage peut comporter, la réalisation de drains à l'aval est bénéfique à court terme pour la piézométrie sous l'ouvrage, à condition de bien maîtriser les débits résultants ;
- une détermination précise des paramètres mécaniques de l'ouvrage et de la fondation, en vue de la réalisation de calculs de stabilité, a été rendue possible par la campagne de reconnaissances.

C'est à la lumière de ces éléments de compréhension nouveaux, du suivi de l'auscultation et notamment de l'évolution des sous-pressions sous l'ouvrage, et enfin de la réalisation de calculs de stabilité complémentaires que la pertinence des différentes solutions de confortement a été évaluée.

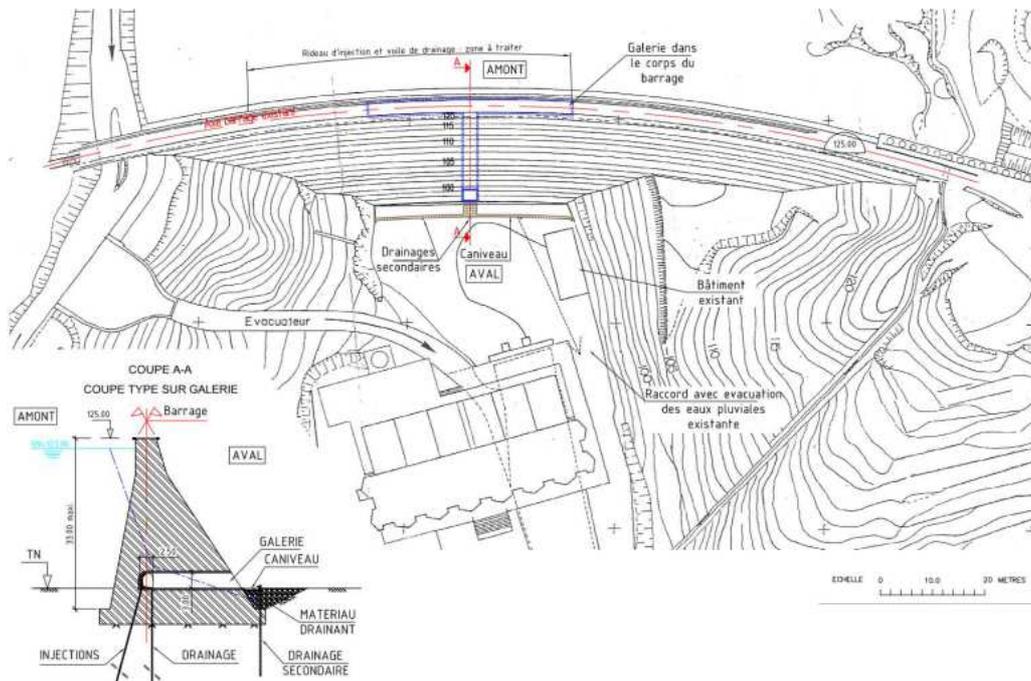
##### **4.1 Différentes possibilités de confortement**

Ces cinq dernières années, quatre solutions de confortement ont pu être envisagées pour le barrage [4].

##### Solutions n°1a, 1b et 1c : diminution des sous-pressions sous l'ouvrage au moyen d'un voile d'injection associé à un réseau de drainage

- Solution n°1a : Injection et drainage avec galerie à l'amont

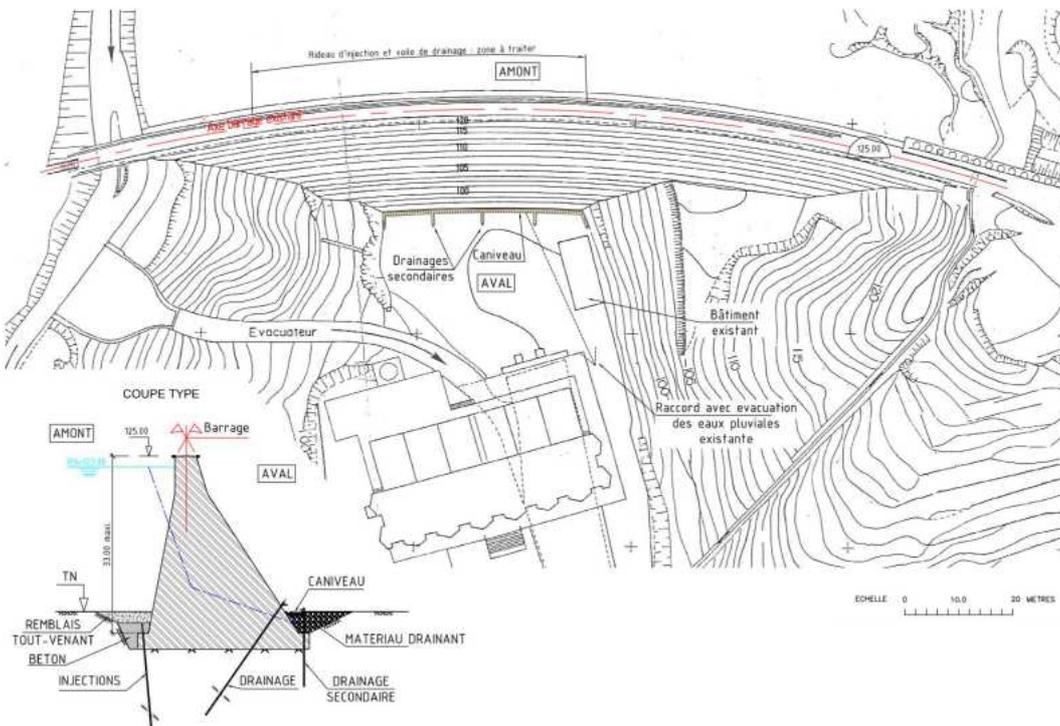
Une galerie située au centre du barrage est creusée depuis une galerie d'accès débouchant en pied aval. Cette galerie n'intéresserait que les profils clés où des réserves de stabilité doivent être apportées, sur une longueur développée de 40 mètres. Le voile d'injection et le rideau de drainage sont réalisés depuis la galerie.



**Graphique 6:** Principe de la solution de confortement 1a

- Solution n°1b : injection et drainage sans galerie

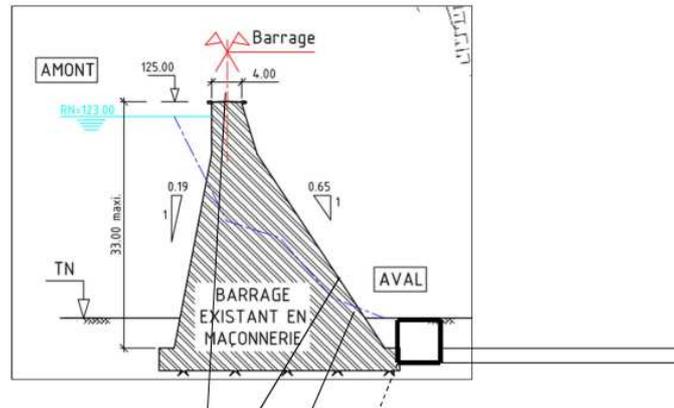
Le rideau d'injection est réalisé depuis une plinthe en pied amont du barrage. Le rideau de drainage est foré depuis le pied aval du barrage, uniquement au droit de la partie centrale du barrage.



**Graphique 7:** Principe de la solution de confortement 1b

- Solution n°1c : injection et drainage avec galerie à l'aval.

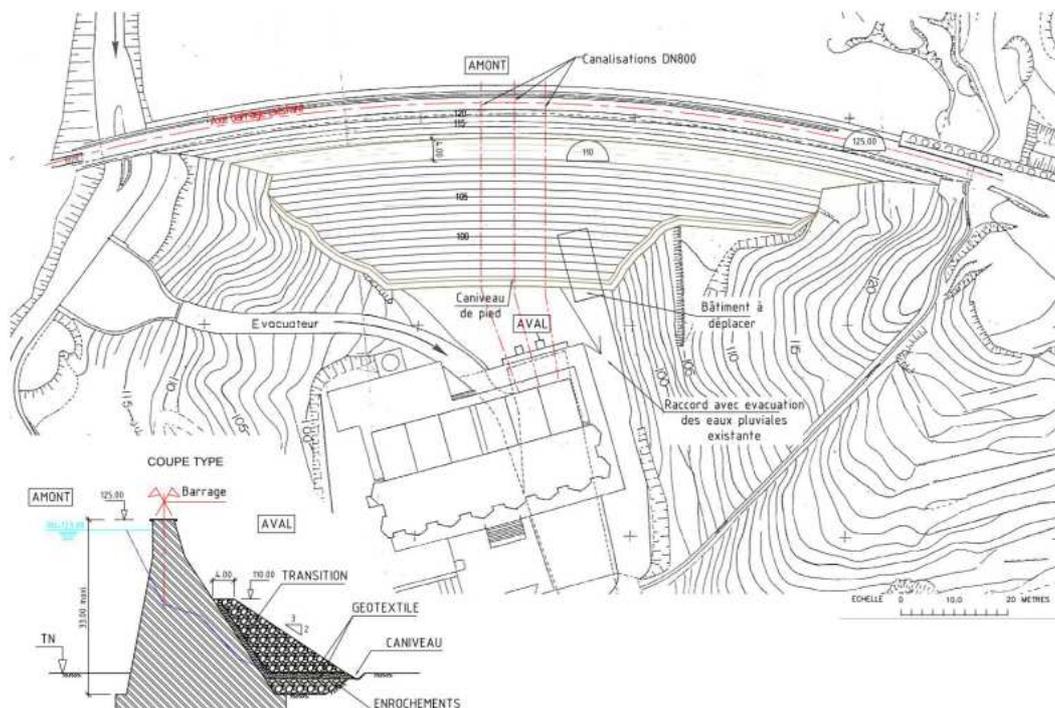
Une galerie de drainage est réalisée au pied aval du barrage avec un radier situé au niveau de la fondation (contact maçonnerie/rocher) soit environ 5 m sous le niveau de la plate-forme aval. Les eaux de drainage sont évacuées vers la rivière par l'intermédiaire d'une conduite. Des injections de collage sur une profondeur de 5m (bulbe d'injection) sont réalisées à partir du parement aval et la crête du barrage. Cette solution permet d'abaisser la pression aval au niveau du contact maçonnerie/fondation. Pour le drainage du corps du barrage, des drains horizontaux pourraient être exécutés à partir de la galerie de drainage.



**Graphique 7:** Principe de la solution de confortement 1c

### Solution n°2 : remblai aval

Un remblai de confortement est placé contre le parement aval du barrage. Il augmente le poids de la structure et donc sa stabilité. Il est à noter que cette solution ne traite que les conséquences du problème et ne permet pas de traiter ses causes (augmentation des sous-pressions sous l'ouvrage) ni de se prémunir contre une dégradation de la situation actuelle (montée de la piézométrie aval) qui peut survenir à plus ou moins brève échéance sans mesure correctrice. Cette solution pourrait pour cette raison être couplée avec la réalisation d'une galerie de drainage.



**Graphique 8:** Principe de la solution de confortement 2

## 4.2 Solutions écartées

Les solutions 1a et 1b ont été écartées pour les raisons suivantes.

Bien que la création d'une galerie d'injection et de drainage (solution 1a) présente l'intérêt de permettre l'observation de l'état de la maçonnerie du cœur de l'ouvrage, elle présente des inconvénients majeurs :

- une fragilisation très importante du barrage, en lui ôtant notamment 5% à 10% de son poids au droit du profil où est réalisée la partie de jonction avec l'aval ;
- la réalisation d'une telle galerie s'avérerait très dangereuse, au vu de l'âge du barrage et de l'incertitude sur la tenue de la maçonnerie lors du creusement de la galerie : les vibrations créées risqueraient de conduire à de forts désordres sur l'ouvrage et à le fragiliser durablement.

La solution d'injection et de drainage sans galerie (solution 1b) nécessite la réalisation des ouvrages suivants :

- une galerie de dérivation provisoire ;
- un batardeau pour réaliser les injections à l'amont après vidange de la retenue ;
- une plinthe amont en béton avant réalisation de forages pour injection.

La réalisation de ces ouvrages pose de nombreux problèmes techniques.

La création d'une galerie de dérivation provisoire serait très complexe au vu de la fondation du barrage : calcaire fissuré au centre et en rive droite, éboulis et marnes en rive gauche. L'exécution de cette galerie qui devrait passer sous l'ouvrage sera donc soumise à de forts aléas notamment géotechniques.

L'exécution de la plinthe serait très difficile. Exécuter cet ouvrage en béton de façon correcte dans la vase de la retenue sera quasi impossible, or la pose de la plinthe doit être parfaite pour qu'elle joue son rôle d'appui pour les injections. Egalement en raison de l'envasement, l'étanchéité entre la plinthe et le barrage ne pourra jamais être garantie. Or, si de l'eau s'insinuait entre la plinthe et le pied amont du barrage, l'effet du voile d'injection amont serait réduit à néant. En lien avec la vidange de la retenue, pour injecter sans problème depuis l'amont, il serait nécessaire de créer dans la retenue un batardeau de dimensions comparables à celles du barrage actuel, ce qui s'avérerait délicat vu l'envasement de la retenue et le délai de mise en place d'un tel batardeau.

Le curage de la vase de la retenue n'est pas envisageable au vu de l'ampleur des travaux que cela constituerait.

### **4.3 Solution retenue**

Avant la réalisation de la campagne de reconnaissances de 2012-2013, la solution 1c avait les faveurs des experts impliqués dans le suivi du barrage, bureau d'études et appui au contrôle. En effet, cette solution lutte contre le phénomène d'augmentation de la piézométrie à l'aval mis en évidence ces dernières années sur l'ouvrage, et la réalisation de quelques drains n'avait jusque-là pas présenté de difficultés (aucun incident survenu avant celui de décembre 2012) et avait prouvé son efficacité.

Toutefois, plusieurs éléments sont venus remettre en cause cette solution.

Les calculs de stabilité récents montrent qu'un drainage efficace à l'aval ne permet pas de gagner énormément sur le coefficient de sécurité, en regard des importants travaux à réaliser.

Le drainage systématique à l'aval peut s'avérer hasardeux et créer des déboussures de fissures en fondation ; à tout le moins est-il délicat. L'incident de décembre 2012, qui a finalement conduit par la suite à reboucher la majorité des drains en pied aval dans leur partie en fondation, a été révélateur à cet égard.

Le sujet de l'injection appelle peut-être plus de réserves encore. La complexité de la géologie liée à l'absence d'orientation privilégiée de fissures en fondation peut faire craindre une inefficacité d'un traitement par injection, voire l'apparition d'un comportement préjudiciable non nécessairement prédictible dans la répartition des sous-pressions sous l'ouvrage. Il faut rappeler également que les campagnes d'injection des années 1960 et 1980, n'ont pas conduit à des résultats appréciables, en tout cas pas sur le long terme.

S'ajoute à ces interrogations le coût important d'une campagne d'injection à maillage serré, telle qu'elle serait probablement nécessaire.

La faible assurance d'un bénéfice réel sur la stabilité de l'ouvrage et les aléas probables dans la réalisation des travaux ont conduit à préférer la solution 2.

Cette solution permet de disposer d'une marge appréciable sur le coefficient de sécurité, vis-à-vis de la montée éventuelle des niveaux piézométriques à l'aval (notamment plus qu'un drainage à l'aval). Le gain

de sécurité apporté par cette solution est moins aléatoire que celui apporté par les solutions d'injection et drainage.

Le comportement au séisme de l'ouvrage conforté sera étudié dans les phases suivantes du projet.

Cette solution peut d'ailleurs être couplée avec une galerie de drainage à l'aval, du même type que celle proposée pour la solution n°1c. L'avantage est de se réserver la possibilité de pouvoir ultérieurement drainer voire injecter à moyen ou long terme (et ainsi d'abaisser les sous-pressions à l'aval) si cela s'avère nécessaire.

Pour ce qui est de l'augmentation de la capacité de l'évacuateur de crues, le parti aujourd'hui privilégié est l'élargissement de la boîte d'entonnement et du coursier vers le versant rive droite, rocheux. Dans les études de projet, il sera tenu compte de l'existence éventuelle de sous-pressions en fondation de la boîte de l'ouvrage actuel.

Enfin, il est à noter que la solution retenue est compatible avec un maintien de l'usine de traitement des eaux au pied aval du barrage.

## 5. CONCLUSIONS

Le barrage de Dardennes, construit il y a plus de 100 ans, créé une retenue qui permet l'alimentation en eau potable de la ville de Toulon. Cet ouvrage a fait récemment l'objet d'études de diagnostic en vue de son confortement. Le confortement de l'ouvrage est devenu nécessaire consécutivement à la perte de marges, au fil des années, sur les réserves de stabilité présentées par l'ouvrage.

En 2012-2013, une campagne de reconnaissances géotechniques a été menée afin d'améliorer la connaissance du contexte géologique de l'ouvrage en fondation, et de préciser les paramètres mécaniques du barrage et de sa fondation dans le but de réaliser des calculs de stabilité complémentaires.

Les enseignements de la campagne, détaillés et discutés dans cet article, ont été nombreux. On citera notamment :

- la complexité de la fissuration en fondation proche de l'ouvrage ;
- l'aléa géotechnique important lié à la foration de drains en pied aval.

La campagne a permis d'orienter la phase de diagnostic vers la recherche d'une solution de confortement optimale pour l'ouvrage, compte tenu des apports des reconnaissances. Elle a finalement abouti à proposer la mise en place d'une recharge en pied aval du barrage.

Cette solution présente l'avantage, par rapport à toutes les autres, d'apporter un gain de stabilité important, immédiat et maîtrisé ; par ailleurs la réalisation du confortement sera relativement aisée.

## REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier Mme Catherine Casteigts (Société du Canal de Provence) et M. Joseph Gautier (Tractebel Engineering – Coyne et Bellier). Leur expertise technique dans les phases de réalisation et d'analyse des reconnaissances géotechniques a été cruciale.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Compagnie Générale des Eaux – Compte-rendu moral de mars 1910 – M. BERENGIER

[2] Rapport Irstea – 21 décembre 2010 – « Avis sur la mise en sécurité du barrage de Dardennes » - G. DEGOUTTE

- [3] Rapport TRACTEBEL Engineering – « Barrage de Dardennes - Etude géologique de synthèse » – 5 juin 2013 – G. GODDERIDGE
  
- [4] Rapport TRACTEBEL Engineering – « Barrage de Dardennes – Diagnostic travaux de confortement » – 9 juillet 2013 – R. VENIER / J. GAUTIER
  
- [5] Annales des Ponts et Chaussées – article de 1914 – BOUTAN, VILHAN et MERCIER
  
- [6] Commission Internationale des Grands Barrages – mai 2012 – Vieillessement des barrages en maçonnerie – G. DEGOUTTE, E. BOURDAROT, B. TOULEB, P. ROYET, F. COPPEL, X. DUCOS