

Contrôle de l'efficacité d'un écran étanche et retour d'expérience sur les modifications des écoulements dans une digue en charge

Control of the efficiency of a grout curtain and feedback from experience on modifications of flows in a dike under load

Aurélie, A, GARANDET,
Compagnie Nationale du Rhône, 2, rue André Bonin, 69316 Lyon cedex 4
a.garandet@cnr.tm.fr

MOTS CLÉS

Paroi au coulis, digue d'aménagement hydroélectrique, digue perméable, auscultation piézométrique, auscultation thermométrique, surveillance travaux.

RÉSUMÉ

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR), en tant que concessionnaire du Rhône est responsable de près de 400 km de digues perméables constituant la partie linéaire de ses dix-neuf aménagements hydroélectriques. Dans le but d'assurer le confortement de certaines parties de ce linéaire, des ouvrages d'étanchéité peuvent être mis en place. Ces écrans étanches profonds, modifient les hypothèses initiales de conception et notamment les écoulements sur les secteurs de digue traités et les zones de raccordements. L'article présente le cas concret d'une digue du canal d'amenée de l'aménagement de Donzère-Mondragon et de son confortement par une paroi étanche de 1,5 kilomètre de long, en coulis de bentonite et ciment. Pour assurer le suivi de ces travaux, un dispositif spécifique d'auscultation et de contrôle a été mis en place, utilisant notamment la piézométrie. Son suivi sur plusieurs années, a permis de démontrer l'efficacité de la paroi étanche et de faire un retour d'expérience intéressant sur le nouveau comportement de la digue. Cette étude permettra d'orienter les dispositifs d'auscultation et de surveillance à mettre en œuvre pour les futurs projets de restauration des digues en charge.

ABSTRACT

As concessionary of the Rhone River, the Compagnie Nationale du Rhône is responsible for nearly 400 km of permeable dikes composing the longitudinal component of its nineteen hydropower development schemes. Sealing structures have been installed in view to reinforcing parts of this length of dike. These deep grout curtains modify the initial design hypotheses and in particular the flows on certain treated sectors of the dike and areas linking them. The article presents the real case of a dike located on the headrace of the Donzère-Mondragon hydropower plant and its reinforcement by a 1.5 kilometre long cut-off wall made of cement-bentonite slurry. To monitor these works, a specific sounding and control system was deployed, relying in particular on piezometry. Monitoring over several years has permitted demonstrating the efficiency of the grout curtain and provided considerable feedback from experience on the new behaviour of the dike. This study will permit orienting sounding and monitoring systems for implementation in future projects to restore dikes under load.

1. INTRODUCTION

Le cas présenté concerne un tronçon de digue de l'aménagement hydroélectrique de Donzère-Mondragon, en rive gauche du canal d'amenée à l'usine. Ce type d'ouvrage supporte une charge hydraulique permanente et est donc désigné sous la terminologie de « Barrage » selon la définition de la réglementation du 11 décembre 2007.

Nous présenterons d'abord les conditions de réalisation de l'ouvrage dans son contexte historique et technique ainsi que les raisons qui ont provoqué un dysfonctionnement dans le temps. La méthodologie de confortement par paroi épaisse au coulis bentonite-ciment sera détaillée, avec la mise en exergue des risques encourus et des méthodologies permettant d'assurer la stabilité de la digue pendant les travaux. L'article

s'achèvera sur les modalités à retenir pour la mise en œuvre d'un système de surveillance adéquat pendant les travaux de creusement d'une paroi. Ce dispositif est en effet aussi à la base du contrôle de l'efficacité de l'ouvrage étanche réalisé et est indispensable pour le suivi ultérieur de la digue nouvellement confortée. Ces conclusions s'appuieront non seulement sur le cas de Donzère-Mondragon mais également sur un autre chantier de paroi réalisé dans un contexte géologique différent.

2. CONTEXTE ET HISTORIQUE DE LA DIGUE

L'aménagement de Donzère-Mondragon, plus grand chantier d'Europe à l'époque, avec ses 50 millions de mètres cubes de matériaux terrassés, a vu la réalisation des premières digues conçues par la CNR entre 1948 et 1952.[1]

Le canal d'amenée de 17 km de longueur a été implanté entièrement dans les alluvions du Rhône déposées sous forme de terrasses. De manière globale, on peut distinguer la terrasse des alluvions wurmiennes composées de sables, graviers et galets et la terrasse d'alluvions récentes composées essentiellement de limons sablo-argileux. Plus en détail, sur le secteur à l'amont de Bollène, la plaine de la Gaffière était un secteur marécageux mal drainé où l'on trouva de façon prépondérante des matériaux limoneux de mauvaises qualité avec la présence de niveaux argilo-tourbeux.

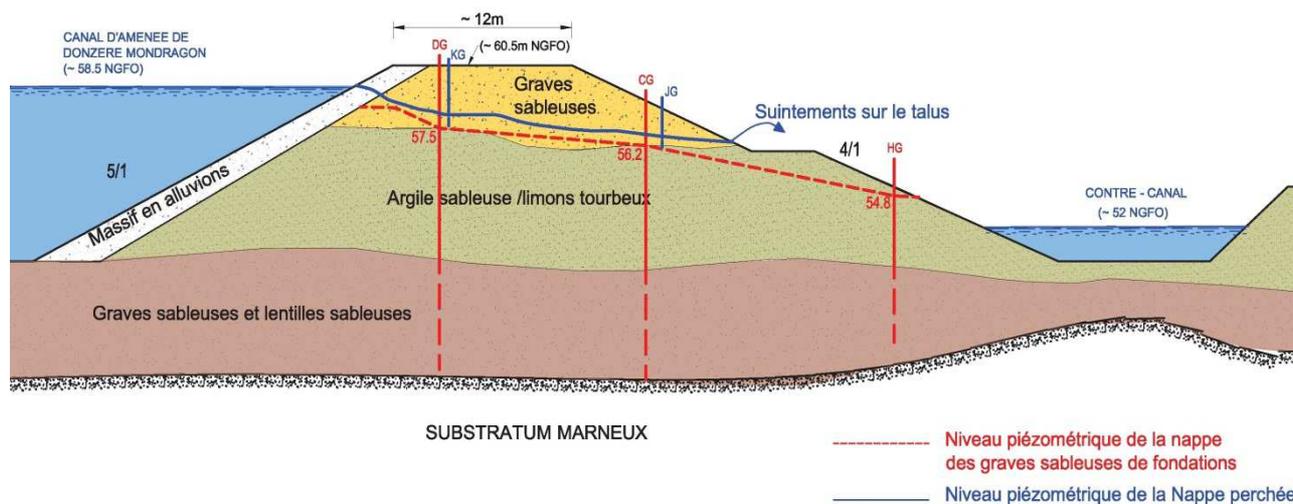
Dans leur conception, les digues du canal de Donzère-Mondragon, et in fine tous les aménagements CNR (hormis le canal de Chautagne), ne sont pas étanches et leur charge hydraulique est contrôlée et drainée par un canal de drainage (appelé contre-canal). Cette option de construction a été dictée par l'utilisation exclusive de matériaux du site (pour raisons économiques) et par le caractère majoritairement perméable des alluvions du Rhône. Répondant à ces principes, le profil de digue adopté sur ce secteur de la Gaffière prévoyait théoriquement la mise en place d'un noyau limon compacté, encadré côté amont canal par une protection en alluvions grossières et côté plaine d'un massif drainant.

3. DIAGNOSTIC ET CHOIX DE LA SOLUTION DE CONFORTEMENT

A partir de 1994, des zones de suintements sont apparues sur le talus aval de la digue sur le secteur de la Gaffière, plus exactement au PK 182.700 RG et au PK 182.960 RG. Il est probable que le phénomène se soit manifesté bien plus tôt, mais aucun historique n'a pu être retrouvé. Ces suintements se situent assez haut dans le talus de la digue et sont couplés à des niveaux piézométriques élevés dans le corps de digue.

Diverses reconnaissances géotechniques dans les années 1990 puis dans les années 2000 montrèrent la présence de couches plus ou moins tourbeuses et argileuses dans le corps de digue en lieu et place des limons théoriques et l'absence d'un massif drainant en pied. L'implantation de plusieurs piézomètres complémentaires dans les différentes couches identifiées a permis de mettre en évidence deux anomalies hydro-géotechniques.

La première concerne la nappe de fondation identifiée dans les sables et graviers qui présentait une mise en pression. Celle-ci étant due à l'existence d'une couche argileuse imperméable sus-jacente renforcée par la remontée du substratum au niveau du contre-canal, réduisant ainsi l'aquifère (voir graphique 1). La deuxième anomalie, est la présence d'une autre nappe, celle-ci perchée au dessus de ces niveaux argileux. Ces niveaux étant localisés assez haut dans le corps de digue, ils forment un support étanche entraînant la résurgence d'eau vers le milieu de talus aval.



Graphique 1: Coupe géologique de synthèse vers le PK 182.7 de la digue rive gauche du canal de Donzère-Mondragon

Le phénomène de nappe perchée s'avéra être très localisé en deux points du linéaire, tandis que la mise en pression par la nappe des graves sableuses de fondation était un problème plus général impliquant 1000 à 1500 m de digue.

Une évaluation de la stabilité de l'ouvrage a été réalisée concluant que le coefficient de stabilité requis ($F=1,5$) n'était pas atteint. Les différents calculs de stabilité et études de sensibilités des paramètres mécaniques et hydrauliques ont montré que l'on se situait autour de 1,3. Un traitement s'avérait donc incontournable pour garantir la pérennité de l'aménagement et pour répondre aux nouvelles exigences réglementaires. Notons, que le coefficient de stabilité qui avait été retenu lors de la conception était de 1,4.

Une étude d'avant projet en 2007 orienta la solution de confortement vers la réalisation d'une coupure étanche sur un linéaire de 1,5 km. Cette solution traverse l'ensemble du corps de digue et s'ancre dans le substratum imperméable (marnes) permettant de supprimer tout écoulement entre le canal et le contre canal, et ainsi de supprimer les sous pressions. En outre, cet écran arrête les écoulements parasites (nappe perchée).

La technique retenue fut une solution de paroi au coulis de bentonite/ciment épaisse (0.6m) avec des injections de sol au coulis de bentonite/ciment au droit d'un ouvrage béton traversant (au siphon dit de « la Gaffière »). La solution devait permettre d'atteindre le coefficient de sécurité de 1.5 en diminuant de 2,5 m la charge hydraulique constatée dans les piézomètres.

La phase projet a vu s'affiner la solution de paroi étanche avec la réalisation d'une campagne de reconnaissances géotechniques. Celle-ci avait un double objectif : reconnaître les sols (caractéristiques de perméabilité, nature des marnes, lithologie) et équiper chacun des forages en piézomètre. Ceux-ci ont fait partie du dispositif de surveillance pendant la phase travaux et sont utilisés depuis pour le contrôle du comportement de la digue (dispositif principal d'auscultation).

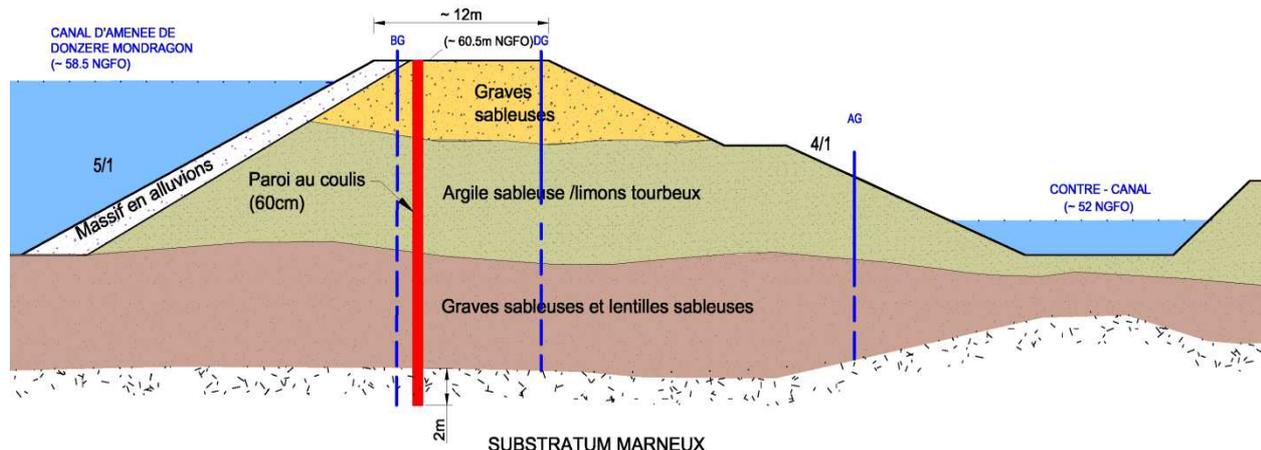
Ces reconnaissances ont permis d'établir une lithologie assez précise du toit du substratum grâce à un sondage tous les 30 m à 50 m en moyenne, montrant une cote assez régulière dans l'ensemble, ponctuée par deux zones de surcreusement. Quelques hétérogénéités dans ces marnes ont aussi été détectées, liées à l'altération à l'interface avec les graves sableuses. La perméabilité des marnes saines a été évalué entre 10^{-7} et 10^{-8} m/s. Concernant les matériaux de digue et de fondation, la présence de tourbe a été confirmé sur l'ensemble du linéaire ainsi qu'une assez forte hétérogénéité au sein de la couche des argiles sableuses/limons tourbeux.

4. PRESENTATION DES TRAVAUX ET DE LEURS SPECIFICITES

4.1 Description des travaux

L'ouvrage est constitué d'un écran dont la profondeur moyenne depuis la crête de digue est de 19 m, dont 2 m d'ancrage dans les marnes (graphique 2). Le choix d'un écran épais a été décidé pour garantir sa durabilité dans le temps et notamment pour les cas d'événements majeurs, de type séisme, qui pourraient endommager l'écran par fissuration.

L'ouvrage a été exécuté en deux tranches de travaux, une tranche ferme réalisée en 2009 et une tranche conditionnelle en 2010, effectuées par la même entreprise.



Graphique 2 : Coupe de principe d'implantation de la paroi étanche

La réalisation de l'écran étanche débuta par la mise en œuvre de murettes guides (graphique 3) permettant à la fois de matérialiser l'implantation de la paroi, de stabiliser le terrain en tête de part et d'autre de la future fouille et de servir de guide à la benne de forage. Le creusement de la paroi s'est effectué avec une benne à câbles suspendue à une grue (graphique 4). Tandis que la première passe est en cours d'excavation, un circuit d'alimentation achemine vers la paroi du coulis de bentonite-eau et ciment. Ce coulis, maintenu à un niveau constant dans la fouille garantit la stabilité des parois de cette dernière et, après séchage, forme l'écran étanche. Au cours des deux tranches de travaux, 26 000 m² d'écran ont été réalisés avec une cadence journalière de l'ordre de 200 à 240 m² par jour (soit environ 12 mètres linéaire par jour). Cette cadence était assurée par deux postes de 8 heures: 6h-14h et 14h-22h.



Graphique 3 : Murettes guides



Graphique 4 : Benne à câbles et paroi en cours d'exécution

4.2 Risques et dispositif de surveillance en cours de chantier

4.2.1 Surveillance de l'excavation

Tout barrage est un ouvrage de sûreté hydraulique et les phases de travaux dans un but de confortement ou de modernisation peuvent mener à des situations critiques qui doivent être anticipées dès le stade des études. Pour cela, un dispositif de surveillance adéquat et des solutions préventives doivent être étudiées en fonction de la technique de travaux et du comportement connu de l'ouvrage.

Au cours de la réalisation d'une paroi épaisse, on vient créer une fouille au cœur de la digue dont la stabilité des parois n'est assurée que par la qualité du coulis en interaction avec le sol traversé et les éventuels écoulements qui le parcourent.

Les risques encourus lors de ce type de travaux sur une digue en charge ou barrage (ceci est d'autant plus vrai que la section de la digue-barrage est peu large) sont :

- risque de chute importante du niveau de coulis dans la fouille, lié à des passages d'eaux préférentiels dans le corps de digue, ou à la présence de zones de matériaux plus crus.
- risque d'effondrement plus ou moins important des terrains en cours d'excavation.

Ces deux phénomènes peuvent se succéder et engendrer par « effet domino », un effondrement plus important menant à la surverse puis à la ruine de l'ouvrage.

Ainsi, dans cet enchaînement, tout est contrôlé par le maintien d'un niveau constant du coulis dans la paroi. Ce niveau doit donc être surveillé nuit et jour, week end et jours fériés, tant que le coulis n'a pas fait sa prise (de l'ordre de 2 jours).

Sur les travaux de paroi de Donzère-Mondragon, le constat visuel pendant les horaires de chantier était obligatoire. Les dispositions préventives mises en place face au risque de chute du niveau du coulis dans la paroi, étaient les suivantes :

- arrêt de l'excavation
- augmentation du débit d'alimentation du coulis
- densification du coulis pour colmater les fuites
- présence d'un stock de sable et de sacs de ciment au droit des zones en cours d'excavation (stock déplacé à l'avancement du chantier) pour remplir la fouille et stopper « l'hémorragie » si les solutions précédentes n'ont pas été suffisantes.

De même, en dehors des horaires de chantier, s'appliquaient les mesures suivantes :

- surveillance automatique du niveau de coulis dans la paroi avec un renvoi sur GSM en cas de chute en dessous la cote des murettes guides.
- présence d'un stock de sable et de sacs de ciment au droit des zones en cours d'excavation (stock déplacé à l'avancement du chantier)

L'ensemble de ces dispositions était assuré par la présence en continu (pendant les horaires des postes de travail) de l'entreprise et d'un contrôleur de travaux de la maîtrise d'œuvre CNR. Pour les autres plages horaires, l'alerte était donnée par un GSM vers un service d'astreinte impliquant l'entreprise, l'exploitant et la maîtrise d'œuvre.

Au final, peu d'alerte ont eu lieu sur ce chantier. Cela fut différent pour un autre chantier du même type sur une digue de l'aménagement de Beauchastel constituée de matériaux beaucoup plus perméables et, pour laquelle des zones de cheminement préférentiel, voire d'érosion interne avaient été diagnostiquées. Pour ce cas, les pertes brutales de coulis furent nombreuses, mais sans évolution néfaste pour la digue du fait de la mise en œuvre des solutions préventives citées plus haut.

4.2.2 Surveillance de la digue

La surveillance en cours de travaux ne doit pas se cantonner à la zone d'excavation. La digue ou barrage doit faire l'objet d'une surveillance rapprochée pour détecter toute évolution vers un comportement anormal lié aux travaux.

Ainsi, un constat visuel journalier du talus aval de la digue de Donzère Mondragon était réalisé par l'entreprise et le contrôleur de la maîtrise d'œuvre. L'objectif était de détecter toutes les anomalies visibles. Une liste des points sensibles et des facteurs à détecter a été dressé pour aider à la réalisation de ce constat comprenant notamment la résurgence de coulis sur le talus aval de la digue ou dans le contre-canal, l'aggravation des fuites existantes ou l'apparition d'une nouvelle fuite

En complément, des mesures également journalières s'effectuaient dans les piézomètres. Un peu plus d'une centaine de piézomètres sont présents le long de la paroi. Ce dispositif est implanté suivant le principe d'un binôme de piézomètres (un piézomètre à l'amont de la paroi nommé BG et l'autre à l'aval nommé DG -voir graphique 2) réparti sur la crête de digue tous les 30 à 50 m de part et d'autre la paroi. On retrouve également des piézomètres en milieu de talus aval et en pied répartis tous les 100m. Enfin, une densification du réseau a été volontairement réalisée aux deux extrémités de la paroi. Sur chacun des piézomètres des seuils de vigilance et d'alerte avaient été fixés.

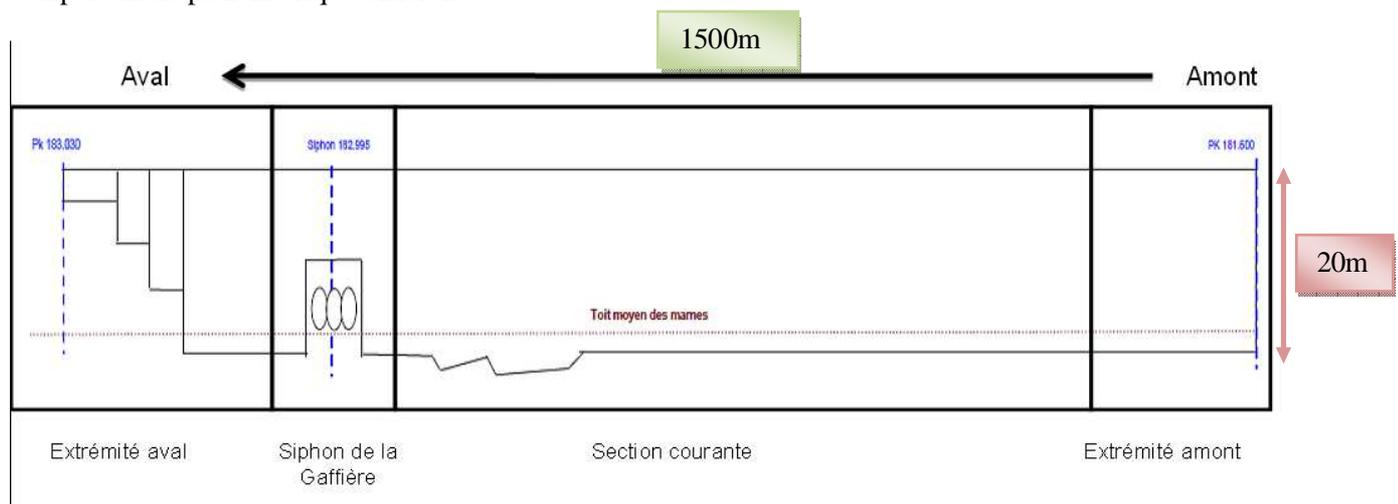
5 VERIFICATION DE L'EFFICACITE DE LA PAROI

5.1 Constat visuel

Quelques temps après les travaux de la tranche ferme (juillet 2009), les divers points de fuites qui étaient présents avant les travaux se sont peu à peu ressuyés montrant que les écoulements ont été stoppés. Depuis cette date plus aucun suintement n'a été constaté.

5.2 Résultats piézométriques

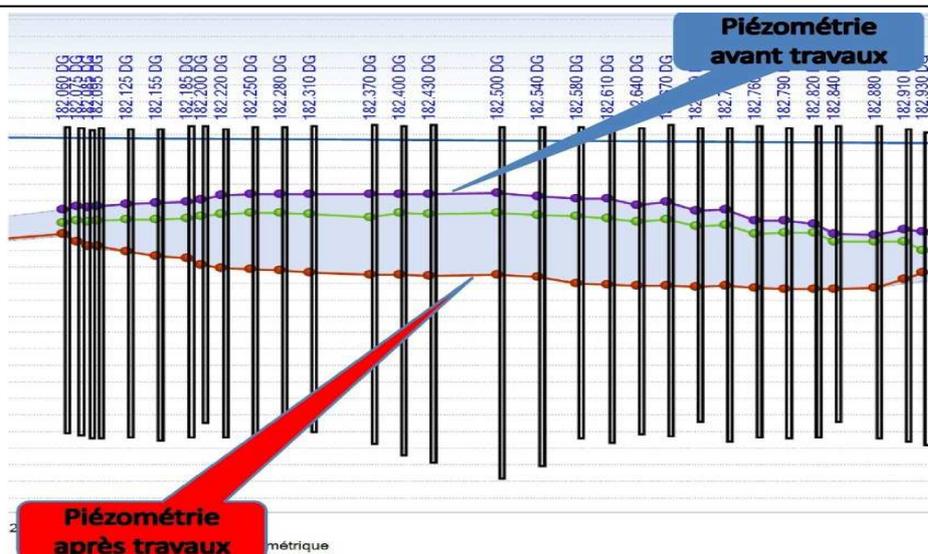
Pour la vérification des charges hydrauliques dans la digue après les travaux, l'ensemble des piézomètres cités plus haut a été exploité pendant plus d'un an avec des fréquences de mesures allant de la semaine au mois selon le secteur. Pour présenter ces résultats nous nous appuyerons sur le schéma (graphique 5) ci-dessous. Il représente une élévation des 1.5 km de la digue confortée, sectorisée suivant 4 zones au comportement piézométrique différent.



Graphique 5 : Profil schématique des différentes sections de la digue le long de la paroi

Les observations sur la section courante sont les plus marquantes et montrent que l'objectif de diminuer les sous-pressions dans la nappe de fondation est atteint. On observe en effet, un rabattement du niveau des piézomètres DG (coté plaine) à la cote 53, soit une diminution de charge de l'ordre de 3 m par rapport à une situation initiale comme le montre le graphique 6. Le niveau piézométrique correspond à la cote approximative du contre canal (qui constitue un point d'équilibre entre les eaux de percolation de la digue et les eaux de la nappe de plaine). L'objectif des travaux qui avait été fixé à un rabattement de 2.5 m fut donc atteint.

Parallèlement à cela, et étant donné le caractère non étanche de la plupart des talus amont des digues, le niveau piézométrique augmente de 1.5 à 2 m côté canal jusqu'à atteindre la cote du plan d'eau (fluctuant entre le plan d'eau et 1 m au dessous).

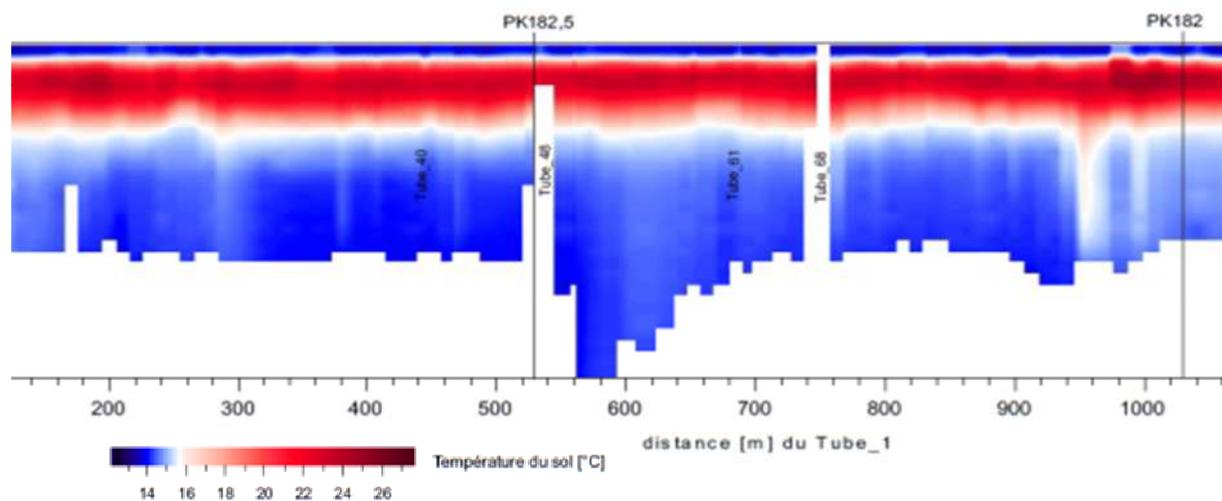


Graphique 6 : profil en long piézométrique sur la section courante de la paroi

5.3 Résultats thermométriques

Lors de la réalisation des passes de forages, des tubes acier creux de 12 cm de diamètre furent centrés dans le coulis frais. L'espacement prévu entre chacun des tubes est de 15 à 20 m et ils descendent à la même profondeur que la paroi. Ces tubes avaient été prévus au marché pour contrôler la pérennité de l'ouvrage en moyen complémentaire aux piézomètres. Le principe repose sur la mesure de température au cœur de la paroi et de son lien avec la vitesse d'écoulement de l'eau au sein de la digue.

Le graphique 7 représente les résultats obtenus suite à la campagne de mesures de décembre 2011. Certains tubes n'ont pu être auscultés du fait de leur blocage, il figurent sans données (blanc). La température du Rhône le jour de cette mesure était de 11°C. La transition entre les couleurs rouge et bleue se fait vers la cote 53 m NGFO (Nivellement Général de la France en repère Orthométrique) et correspond à la profondeur de la nappe stabilisée après les travaux de paroi.



Graphique 7 : résultats de la campagne de mesure thermométrique sur la section courante

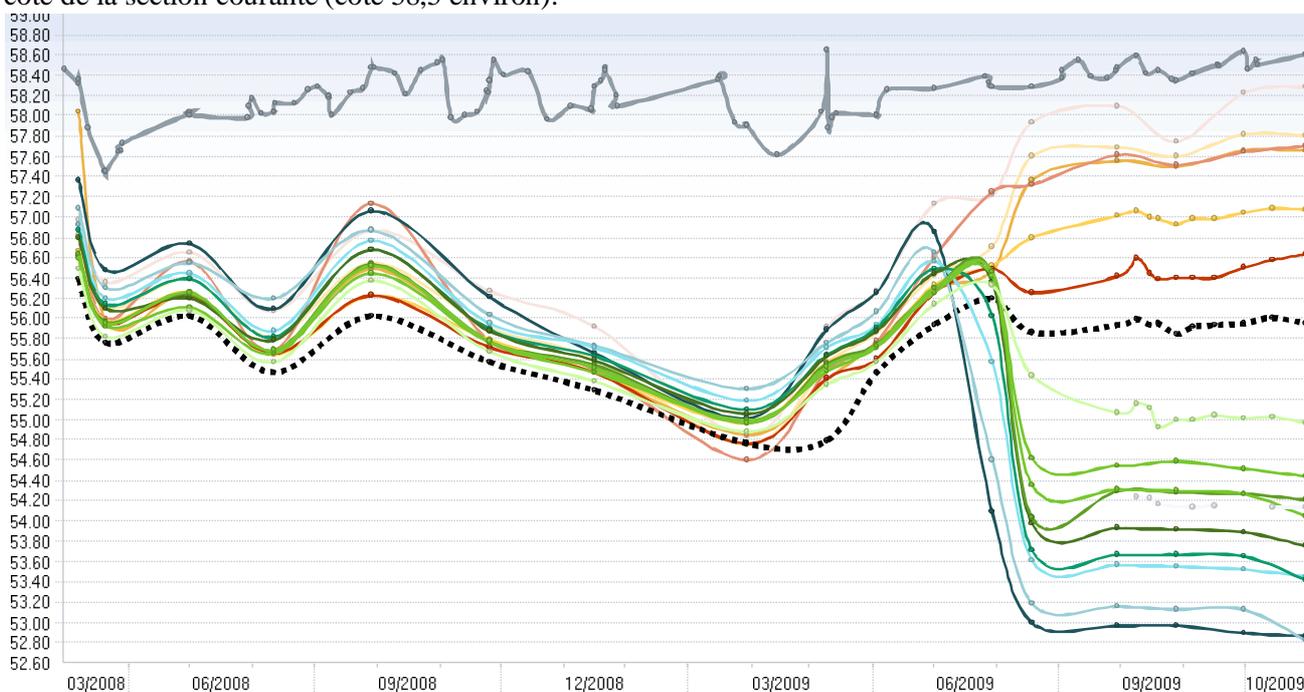
La répartition des températures au cœur de la paroi dans la zone où elle est totalement immergée (zone bleue homogène indiquant une température de l'ordre de 15°C) montre une étanchéité et homogénéité satisfaisante de la paroi. Le même constat est fait pour la partie supérieure en rouge. Sur cette zone la face de la paroi coté canal est saturée tandis que coté plaine les sols sont secs, et les températures mesurées dans la paroi correspondent à celle du Rhône l'été antérieur. De ce décalage thermique entre la température mesurée dans la paroi et celle du Rhône le jour de la mesure, est déduit la vitesse de percolation thermométrique, évaluée ici inférieure à 10^{-6} m/s.

6. COMPORTEMENT AUX EXTREMITES

La mise en place de cette paroi étanche a certes résolu le problème majeur qui était la charge hydraulique trop importante sous le corps de digue, en la rabattant de 3 m ; cependant elle a induit un nouveau comportement hydraulique notamment aux zones d'extrémités de l'ouvrage. C'est ce que nous allons développer dans la suite. En préambule, nous noterons que le sens d'écoulement global du canal d'aménée est nord-sud et les écoulements dans la digue sont donc influencés par cette direction globale.

6.1 Comportement sur l'extrémité amont

Le graphique 8 détaille le comportement piézométrique au PK 182 dans le secteur d'arrêt de la paroi en tranche ferme. Il est gradué en temps sur l'axe des abscisses et en cote NGFO en ordonnées, l'ensemble des courbes de différentes couleurs représente les piézomètres situés autour de cette extrémité. La courbe grise oscillant vers la cote 58,3 m NGFO correspond au niveau du canal d'aménée. Les couleurs chaudes ont été employées pour les piézomètres BG situés coté canal en amont de la paroi, tandis que les couleurs froides correspondent au piézomètre DG en aval de la paroi. On note, à partir de juin 2009 (qui correspond à la fin de la tranche ferme des travaux) une dissociation dans le comportement des piézomètres BG et DG. Le rabattement hydraulique induit par la paroi sur les piézos DG se fait graduellement : plus le piézomètre est éloigné de l'extrémité, plus le rabattement est important (gradation du vert vers le bleu). Le rabattement est maximum et équivalent à celui de la section courante à environ 170 m de l'extrémité amont. On observe également une gradation sur les piézomètres BG, où il faut près de 80 m pour qu'il y ait un raccordement à la cote de la section courante (cote 58,5 environ).



Graphique 8 : Evolution piézométrique sur l'extrémité amont de la digue confortée par la paroi (tranche ferme)

Par ailleurs, on ne constate pas d'influence de la paroi sur la partie de la digue localisée à l'amont hydraulique de la paroi.

6.2 Comportement sur l'extrémité aval

Le comportement sur cette extrémité est plus complexe à analyser car la piézométrie est à la fois influencée par la présence du siphon de la gaffière et surtout ses matériaux de remblais qui n'ont pas les mêmes caractéristiques que la partie courante de la digue, et par la forme terminale de la paroi en « marches d'escalier ».

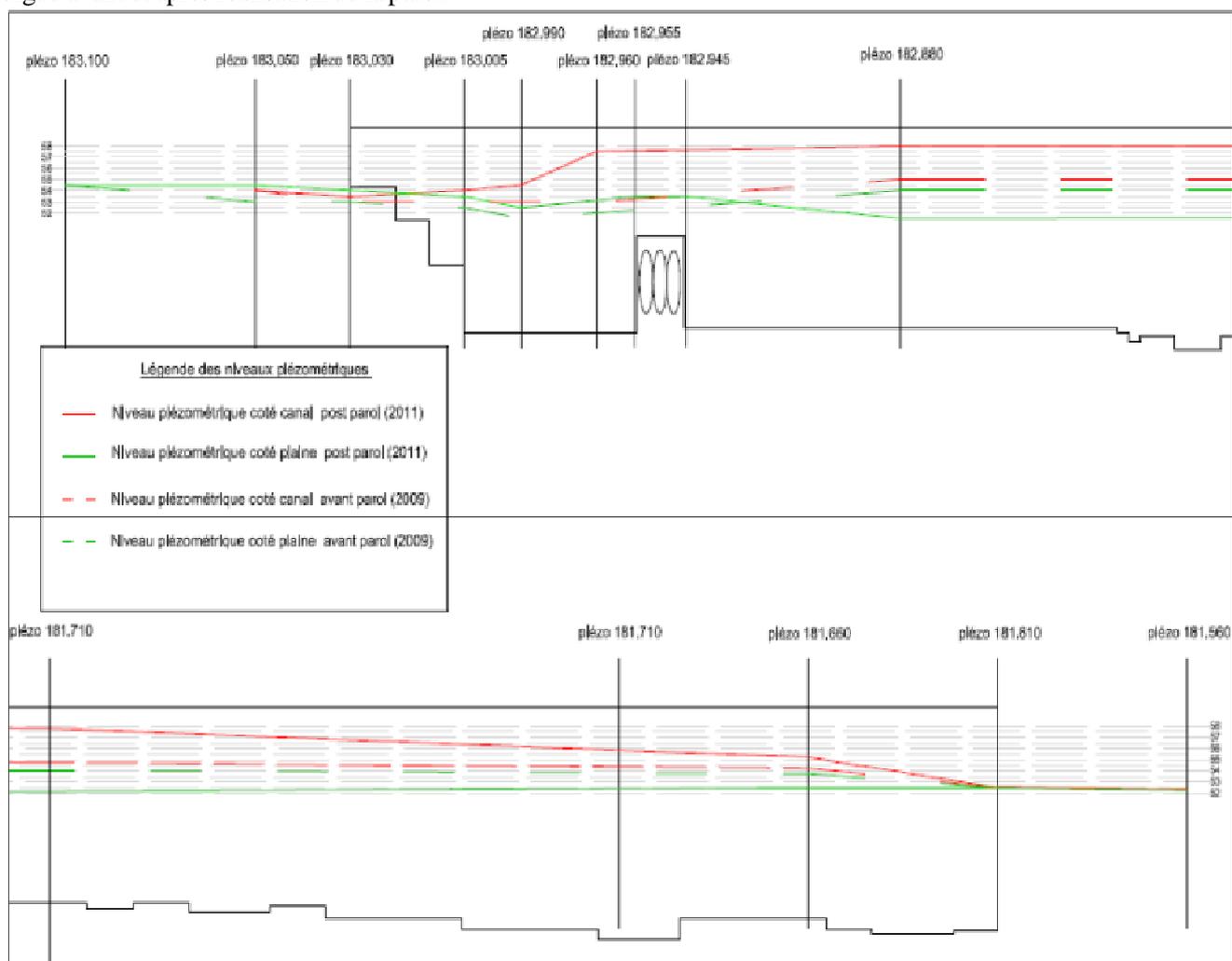
Ainsi, en essayant de s'affranchir des comportements « parasites », les mesures sur l'extrémité de la paroi indiquent que l'on a une légère augmentation de la piézométrie (20 à 30 cm) sur le secteur aval de la paroi située entre les dernières marches d'escaliers et jusqu'à 50m vers l'aval.

En utilisant les mêmes méthodes d'analyse que pour l'extrémité amont, on note, côté canal, une zone de transition qui commence directement à l'aval du siphon de la Gaffière et s'étend jusqu'au PK 183.050 où le niveau

piézométrique redevient celui constaté avant les travaux (54m NGFO). La zone de transition représente donc 90 m au total, dont une partie comprise dans le secteur en « marche d'escalier ».

Côté plaine, on constate là aussi une zone de transition qui débute en amont du siphon où le niveau piézométrique augmente par rapport au niveau constaté en section courante (53 m NGFO). Cette augmentation se fait de manière constante, hormis dans la zone du siphon, jusqu'au PK 183.100 où le niveau piézométrique redevient celui constaté avant les travaux (54.5m NGFO). La zone de transition s'établit donc sur 220 m au total dont 150 m le long de la paroi et 70 m hors paroi.

Le graphique 9 ci-après schématise et synthétise, aux extrémités de l'ouvrage, les niveaux piézométriques de la digue avant et après réalisation de la paroi.



Graphique 9: Synthèse du comportement piézométrique sur l'extrémité aval (en haut) et l'extrémité amont (en bas) de la digue traitée par paroi étanche.

7. CONCLUSIONS ET PRECONISATIONS POUR LA SURVEILLANCE D'UN ECRAN ETANCHE DANS UNE DIGUE EN CHARGE.

En conclusion, nous nous proposons d'étendre nos observations sur le comportement de l'écoulement autour d'une paroi quelconque dans une digue « perméable » en charge et de préconiser la surveillance à mettre en œuvre.

La mise en place d'une paroi étanche ancrée dans le substratum permet un rabattement dans le talus de la digue côté plaine, à une cote qui est dépendante de la nappe de plaine. Parallèlement à cela, et dans le cas où les talus amont des digues ne sont pas colmatés, le niveau piézométrique augmente côté canal jusqu'à atteindre la cote du plan d'eau. Au niveau du raccordement de l'ouvrage étanche à la digue saine, il y a un contournement hydraulique de l'ouvrage étanche, dont le comportement n'est pas le même que l'on soit à

l'amont ou à l'aval hydraulique. Les extrémités sont donc soumises à des zones de transitions piézométriques entre la digue non confortée et ce que nous avons appelé « la section courante » de la digue étanchée:

- extrémité amont, pour « un arrêt vertical » de la paroi, la transition se fait depuis cette extrémité et vers l'aval, sur une distance variable (certainement influencée par la perméabilité du terrain).
- extrémité aval, pour une « jonction en escalier », la zone de transition se fait au droit de la paroi, mais aussi hors zone de paroi, à l'aval hydraulique. Là aussi, les distances peuvent être variables.

Toutes ces considérations sont importantes, car elles permettent de se donner un ordre de grandeur de la longueur d'ouvrage étanche à prévoir dans la partie saine de la digue afin de ne pas influencer négativement la zone à conforter, notamment par la concentration des écoulements en extrémité aval de paroi.

Le tableau ci-dessous permet de lister les méthodes d'auscultation à mettre en œuvre pour garantir une surveillance adéquate en cours de travaux mais aussi permettre un retour complet après travaux sur le comportement de la digue nouvellement étanchée.

Méthodes d'auscultations possibles		
Suivi en cours de travaux	Surveillance du comportement de la digue	Piézomètres de digue proches des panneaux en cours de forage + piézomètre de l'ensemble du chantier pour avoir des points de référence et de l'historique + Visuel sur les points identifiés au préalable
	Surveillance du niveau de coulis dans la paroi	Visuel (chantier en cours) et système d'alerte par GSM (hors horaires de chantier)
Suivi entrant dans le système d'auscultation normal après confortement	Surveillance intrinsèque ou directe de l'ouvrage étanche	Tubes thermométrique à inclure dans la paroi en cours de réalisation.
	Surveillance de la digue (zone de la paroi + extension amont et aval de l'ouvrage)	Piézométrie+ thermométrie

Graphique 10 : Modes d'auscultation possibles pour la réalisation et le suivi d'une paroi étanche épaisse.

Pour la surveillance par piézomètres, nous conseillons de mailler de manière plus dense l'extrémité aval de la paroi étanche, non seulement au droit de la paroi, mais aussi la digue saine (1 piézomètre tous les 15 à 20 m à adapter selon le linéaire de paroi et le contexte géologique). Le secteur courant et amont de la paroi ne nécessitent pas un maillage aussi serré, des binômes de piézomètres (coté canal /coté plaine) tous les 50 à 100 m de paroi suffisent. Ce maillage est à adapter avec la géologie et la mise en place ou non d'une surveillance par thermométrie.

La surveillance par thermométrie nous paraît être idéale pour avoir une image globale de la paroi et détecter les zones de fuites qui peuvent se développer dans le temps. L'implantation doit se faire avec un pas de 15 à 20 m dans la paroi et peut se prolonger en dehors de l'ouvrage sur l'extrémité amont ou aval pour observer les vitesses d'écoulements dans le cas d'une digue avec des horizons assez perméables ou avec un risque d'érosion interne. Cette technique, si elle n'est pas mise en œuvre en cours d'exécution de la paroi peut aussi être installée dans le terrain directement à l'aval de l'ouvrage étanche. Elle peut dans ce cas s'appliquer pour le cas des parois minces (pour lesquelles l'implantation au cœur de l'ouvrage est impossible).

Les deux méthodes : piézométrie et thermométrie sont complémentaires, et peuvent s'employer à des fréquences différentes. Par exemple, l'auscultation normale de l'ouvrage peut se restreindre à des levés piézométriques tandis que la mesure thermométrique peut s'effectuer à la demande suite à détection d'anomalie sur la piézométrie ou suite à un séisme ou une crue.

8. RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Charles Jacob (mars 1955). *Donzère-Mondragon*. Numéro hors série de la Houille Blanche, 22-34