

Auscultation d'un barrage en terre soumis à érosion, du diagnostic aux travaux de confortement

Internal Erosion in a earth-filled dike – from diagnostic to reinforcement works

N. Le¹, B. Chalus², P. Serve³

¹ Compagnie Nationale du Rhône (CNR), Lyon, n.le@cnr.tm.fr

² Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, b.chalus@cnr.tm.fr

³ Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, p.serve@cnr.tm.fr

Résumé

L'endiguement CNR de l'aménagement de Bourg-Lès-Valence, à l'amont immédiat du barrage de la Roche de Glun vers le PK 99.2 RG, a présenté des anomalies de fonctionnement peu après sa mise en eau. Au droit de ce tronçon d'endiguement, le talus aval de digue vient buter contre le soutènement de la tête amont de l'aqueduc en créant une petite plateforme derrière le soutènement.

Depuis 2011, des fontis sur la plateforme de l'aqueduc et des fines observées à la sortie des drains des soutènements ont mis en évidence un phénomène d'érosion interne. Un suivi piézométrique, un suivi de déplacement des murs et des contrôles visuels régulier permettent de détecter toute anomalie de comportement de l'ouvrage. En parallèle, plusieurs actions de reconnaissances (reconnaissance géophysique, géotechnique et mesures thermométriques) ont été entreprises dans le cadre du diagnostic pour préciser le type d'érosion interne, localiser la zone d'infiltration.

En 2015, suite à l'évolution des désordres, les actions préventives ont été menées. Parmi ces actions, le clapage du talus amont de la digue avec des limons a montré une efficacité immédiate : un colmatage des zones d'infiltration à travers de la digue.

Des travaux de confortement définitif de type paroi étanche sont engagés depuis début 2018. La surveillance des ouvrages et le suivi des travaux apportent les informations complémentaires sur le comportement de la digue et permettent de valider la pertinence du diagnostic et du projet de confortement.

Mots-Clés

Erosion interne, digue en terre, diagnostic, travaux de confortement, paroi étanche.

Abstract

The CNR earth-fill embankment of Bourg-Lès-Valence, located directly upstream of the Roche de Glun dam at PK 99.2 RG, presented anomalies shortly after its impoundment. At this section, the dike downstream slope abuts against the retaining walls of an aqueduct, creating a platform behind the retaining walls.

Since 2011, some jugholes on the platform and some zones of seepage with transport of soil particles towards the counterchannel were observed. They reveal an internal erosion phenomenon in the dike. A piezometric monitoring network and regular visits were carried out to detect any anomalous behavior of the structure. In parallel, several site investigations (geophysics, geotechnics and thermometric methods) were undertaken in order to understand the erosion phenomenon and to locate the seepage zones.

In 2015, following a significant evolution of the disorders, some preventive actions were carried out. Among them, a clogging operation using fine soils on the upstream slope brought an immediate effect on reducing the seepage through the dike.

Reinforcement work by creating a cut-off wall was started at the beginning of 2018. The monitoring system and the supervision during the work bring some interesting news on the dike behaviour and allow to confirm the conclusions of the diagnosis and the efficiency of reinforcement project.

Key Words

Internal erosion, earth-filled embankment, diagnosis, reinforcement works, cut-off wall.

Contexte

Localisation

L'endiguement et la plateforme étudiés se situent en rive gauche du Rhône au PK99.2 en amont du barrage de retenue de l'aménagement hydroélectrique de Bourg-lès-Valence, au niveau de la tête amont de l'aqueduc du contre-canal (Figure 1). Cet aqueduc a pour rôle de rejeter les eaux du contre-canal dans le Rhône court-circuité, à l'aval immédiat du barrage de retenue de la Roche de Glun (département de la Drôme).

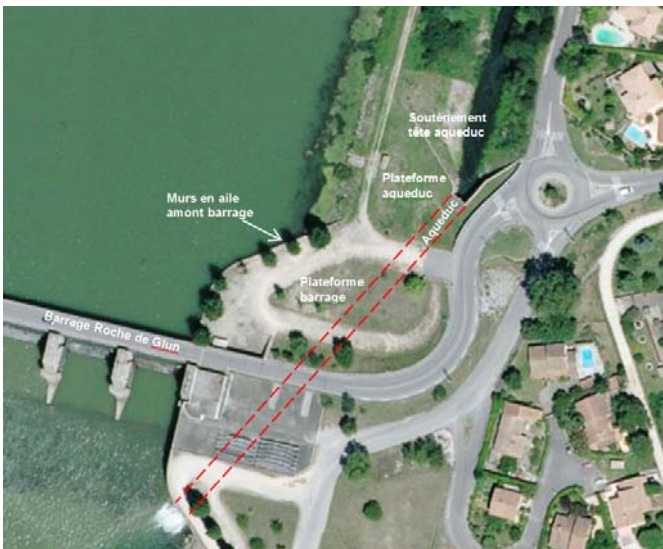
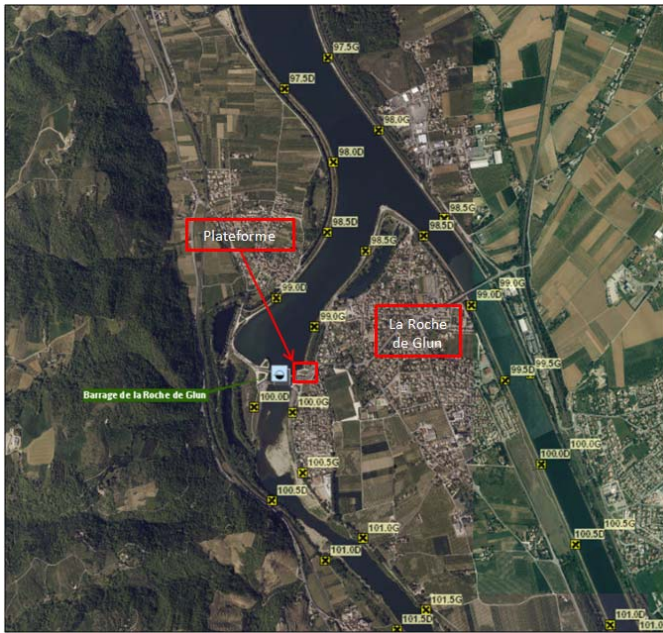


FIGURE 1 : LOCALISATION DE LA PLATEFORME ET DE L'ENDIGEMENT AU PK 99.2 (HAUT) - VUE AERIENNE DE LA ZONE (BAS)

Description de l'ouvrage et désordres

Cette digue d'une hauteur de 9,5 m est de type graviers, reposant sur les alluvions graveleuses en place du Rhône (11 m d'épaisseur environ), ces dernières surmontant un substratum marneux. Enfin, elle est munie de clés en gravier en amont et en aval.

Au niveau du PK99.2, une plateforme se trouve au pied de cette digue graviers. Cette plateforme de la tête amont de l'aqueduc est soutenue par trois murs en béton armé « en aile » alignés prolongeant le mur en retour de l'ouvrage. La semelle du mur est fondée sur un tapis en matériaux drainants d'environ 1,2 m d'épaisseur qui s'étend jusqu'au contre-canal. Ce dispositif a été réalisé initialement pour drainer les eaux de percolation et les eaux de ruissellement à travers la digue.

En 1969, des arrivées d'eaux importantes ont été observées sous le mur en aile et également à travers ses joints, dès la mise en eau de l'aménagement. Des travaux correctifs ont été menés (des barbicanes dans les murs, un fossé drainant pour conduire les eaux d'infiltration dans le contre-canal) mais n'ont pas eu d'effet sur les désordres observés. La tête des murs a eu tendance à basculer vers le contre-canal.

Des travaux de mise en œuvre d'une butée aval ont été ensuite réalisés en 1972 par le battage d'un rideau de palplanches entre les murs et le contre-canal. Les palplanches ont traversé le tapis drainant mis en place sous les murs. Un mur de liaison entre les palplanches et le mur en aile a également été construit et l'espace entre ce rideau et les murs a été comblé par des matériaux drainants (Figures 2, 3 et 4). Pour rétablir le drainage, des orifices ont aussi été percés au pied du rideau de palplanches.

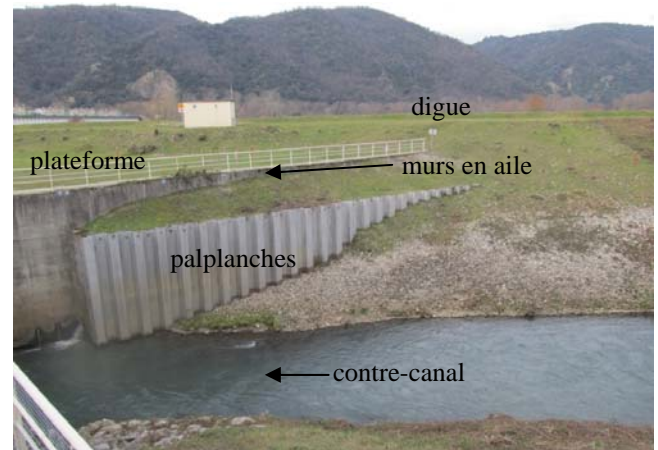


FIGURE 2 : PHOTO DE LA PLATEFORME ET SES SOUTÈNEMENTS - PRISE DE VUE DEPUIS LA PLAINE

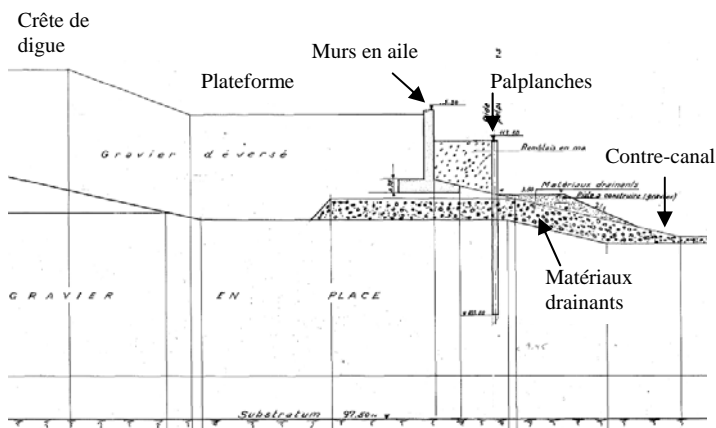


FIGURE 3 : COUPE EN TRAVERS DE LA PLATEFORME

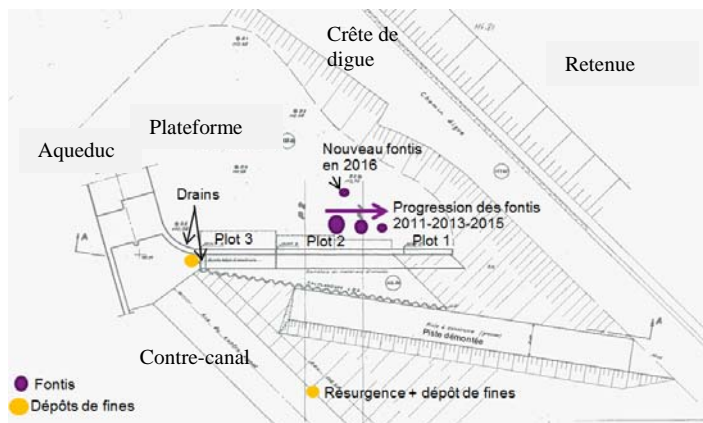


FIGURE 4: VUE EN PLAN DE LA PLATEFORME - LOCALISATION SCHEMATIQUE DES FONTIS

Il n'y a pas eu d'évolution notable sur cette zone jusqu'en 2011 marquée par l'apparition d'un fontis sur la plateforme. Les désordres suivants ont été constatés :

- nombreux fontis au niveau de la plateforme de la tête amont de l'aqueduc : le premier (dimensions 2.8 x 1.8 x 0,7 m) a été observé le 24/11/2011, les suivants plus petits sont apparus plus tard (2013, 2015, 2016), **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**
- des écoulements en pied de digue au niveau de rideau de palplanches et des murs de liaison et de retour de la tête amont de l'aqueduc. Des dépôts de matériaux fins à la sortie des drains et en pied de digue,
- des déplacements différentiels entre le mur en aile et la tête de l'aqueduc et entre les différents murs en aile (certains déplacements ont été déjà observés en 1969 avant les travaux de confortement en palplanches).

Diagnostic de l'érosion interne

Campagnes de reconnaissance – Surveillance

Ces observations in-situ laissent penser qu'un phénomène d'érosion interne est en place dans la zone du PK 99.2. L'origine des désordres observés semble être une anomalie d'infiltration à travers la digue. Afin de confirmer cette première analyse, différentes reconnaissances ont été réalisées sur cette zone :

- reconnaissances géophysiques en 2014,
- reconnaissances géotechniques en 2015 et 2016,
- mesures thermométriques en 2016.

En parallèle, un suivi hebdomadaire des niveaux piézométriques couplé avec les observations visuelles a été mis en place afin de renforcer la surveillance de la zone.

Travaux préventifs en 2015

Suite à l'apparition d'un nouveau fontis et à une hausse de pression de l'eau sur les soutènements en 2015 (hausse du niveau de drains), des mesures préventives ont été mises en œuvre entre mi-août et mi-septembre 2015. Elles consistaient à (Figure 5) :

- décharger la plateforme soutenue par le mur en aile et le rideau de palplanches,
- mettre en œuvre un épaulement en enrochements sur le talus aval de la digue située à l'amont immédiat de la plateforme et devant les palplanches,
- claper des matériaux limoneux sur le talus amont de la digue sur une bande de 3 m de hauteur : du 2 au 10 septembre 2015.



FIGURE 5 : VUE EN PLAN DES TRAVAUX PREVENTIFS EN 2015

L'opération de clapage a montré une efficacité immédiate sur l'écoulement à travers de la digue :

- arrêt des écoulements par les drains (Figure 6 – photographies C et D),
- une baisse du niveau piézométrique sur la quasi-totalité

des piézomètres situés sur le talus aval de digue (Figure 7).

Cette baisse piézométrique sur le talus aval a un effet favorable vis-à-vis de la stabilité des ouvrages. Toutefois, une réactivation progressive des drains est observée au bout de 3 mois. Malgré cette réactivation, les niveaux piézométriques restent globalement inférieurs à ceux mesurés avant le clapage jusqu'aux travaux de confortement en 2018.

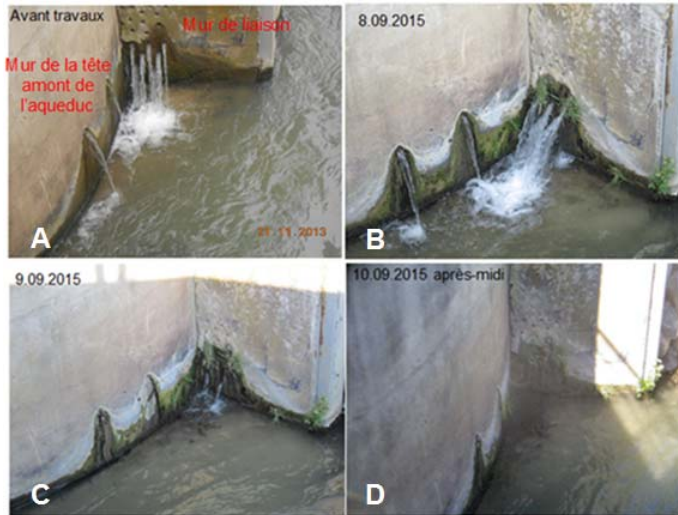


FIGURE 6 : SUIVI D'ÉCOULEMENT DES DRAINS (A : AVANT TRAVAUX – B, C ET D : PENDANT TRAVAUX)

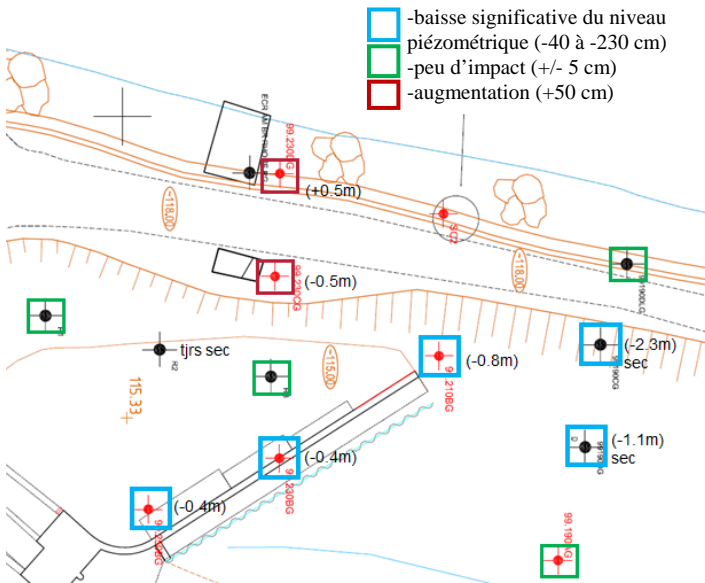


FIGURE 7 : VARIATIONS PIEZOMETRIQUES APRES LE CLAPAGE – VUE D'ENSEMBLE

Analyse des désordres

Les campagnes de reconnaissance géophysique, de mesures thermométriques et l'opération de clapage en limon ont permis d'identifier les écoulements préférentiels au travers de la digue qui sont à l'origine des désordres. Les résultats de ces reconnaissances sont synthétisés dans la Figure 8 :

- La **campagne géophysique** [3] montre une zone d'infiltration sur un linéaire de 50 ml environ avec une zone principale d'infiltration à l'amont immédiate de la rampe à bateaux (bleu foncé). Des infiltrations se trouvent entre -3 à -5 m au niveau de la crête de digue, côté talus amont puis s'approfondissent vers -7 à -9 m par rapport à la crête de digue au niveau de la plateforme.

- L'analyse de l'avancement du **clapage de limon** et l'arrêt des drains, couplé avec le comportement des piézomètres permettent de cerner la zone d'infiltration principale et d'appréhender des écoulements à travers la digue. Ces écoulements des eaux infiltrées vers le contre-canal semblent passer soit à travers la digue située à l'amont de la plateforme, soit à travers de la plateforme, contournant sous les murs en aile avant de se rejeter dans les drains.

- Les **mesures thermométriques** [3] montrent une anomalie d'infiltration sur un linéaire de digue de 80 mètres environ (couleurs bleues sur la Figure 9). Les infiltrations se concentrent entre 3 et 12 m de profondeur par rapport à la crête de digue. Quatre sondages manifestant les anomalies de température les plus importantes T3, T6, T9 et T10 ont été équipés des enregistreurs de données pendant un mois pour permettre d'évaluer les vitesses d'écoulement. La vitesse moyenne dans la digue pour un trajet entre le Rhône et le tube est estimée de l'ordre de 10^{-3} m/s au droit des tubes T3, T6, et de l'ordre de 10^{-4} m/s à 10^{-3} m/s au droit des tubes T9, T10.

À partir des résultats de reconnaissances, la zone d'infiltration principale pourrait être cernée. Une synthèse des écoulements préférentiels présumés est présentée sur la Figure 10.

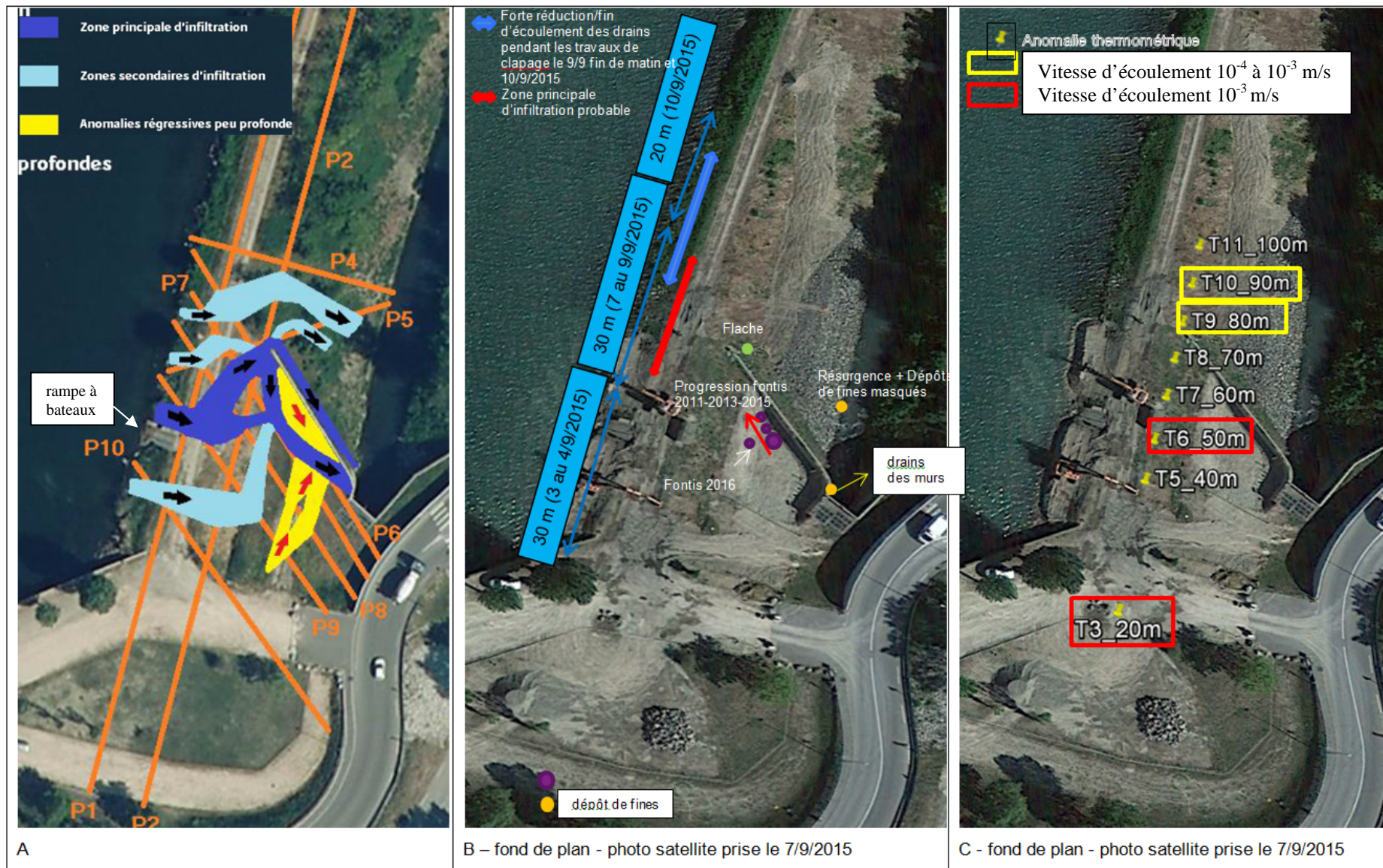


FIGURE 8 : SYNTHÈSE DE RESULTATS DES CAMPAGNES DE RECONNAISSANCE, DE GAUCHE A DROITE : A-GEOPHYSIQUE, B-CLAPAGE, C-THERMOMETRIQUE.

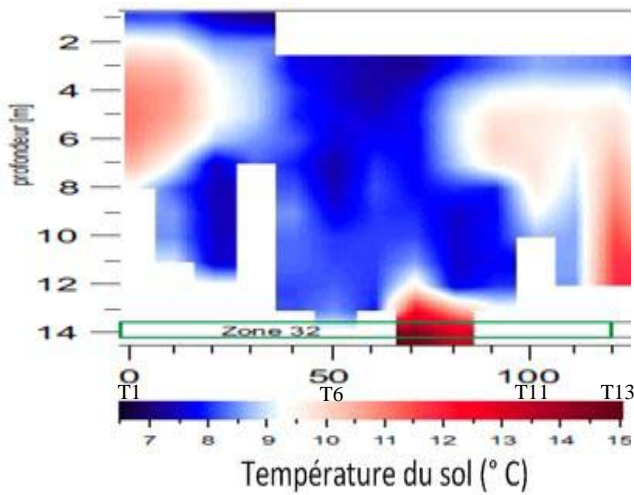


FIGURE 9 : RESULTAT DES MESURES THERMOMETRIQUES (TEMPERATURE DU RHONE 7.3 A 8,5 °C)

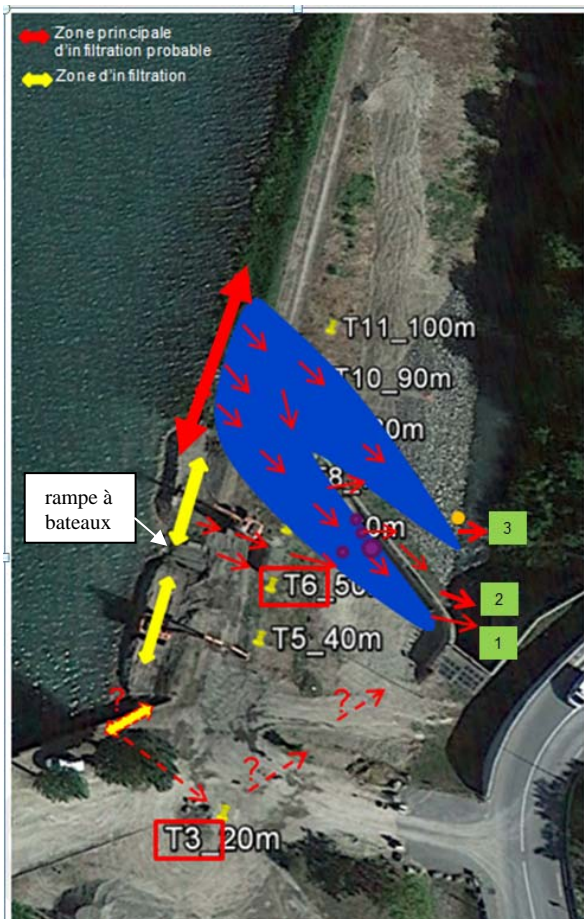


FIGURE 10 : SYNTHESE DES INFILTRATIONS : ZONE PRINCIPALE EN ROUGE (EN BLEU : ECOULEMENTS PREFERENTIELS A TRAVERS LA DIGUE ET LA PLATEFORME), ZONES SECONDAIRES EN JAUNE – 3 RESURGENCES AU CONTRE-CANAL EN VERT.

Étude de la sensibilité à l'érosion à partir des échantillons

L'analyse de l'érosion interne se base sur le guide ERINOH [2]. Ces analyses se basent sur les courbes granulométriques des sols issus de la digue et de la plateforme (Figure 11). Ces analyses concluent sur la coexistence possible de deux principaux mécanismes d'érosion au droit de cette zone : **suffusion et régressive de conduit** ⁽¹⁾.

Cette conclusion confirme les observations sur le terrain (perte des fines, apparition des fontis...).

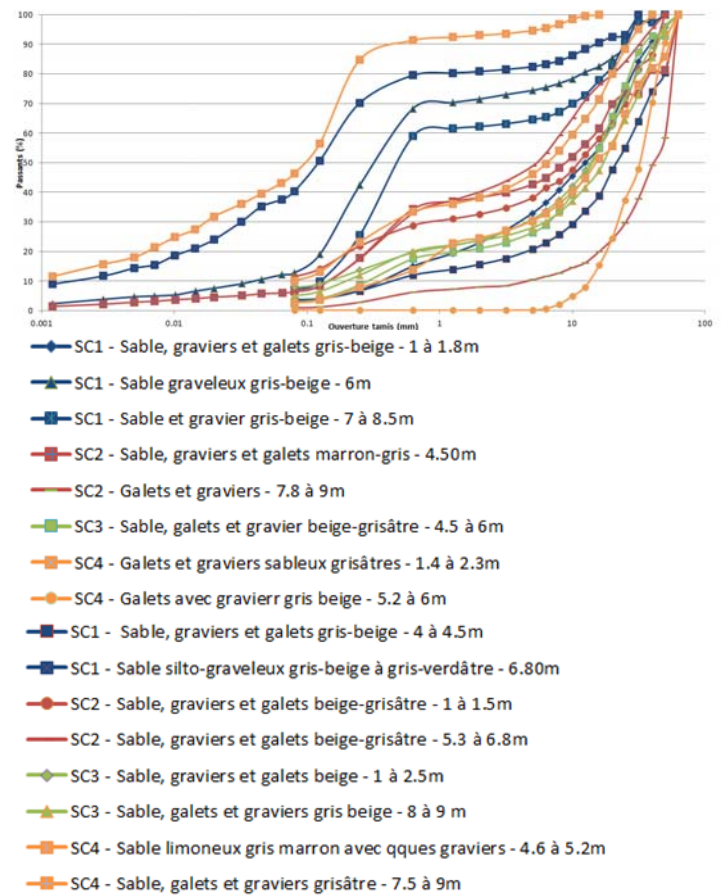


FIGURE 11 : COURBES GRANULOMETRIQUES

Conclusions du diagnostic

La zone d'incident au PK 99.2 RG est soumise à un phénomène d'érosion interne, probablement déclenchée par deux principaux mécanismes d'érosion : suffusion et

¹ Pour rappel,

- La suffusion opère lorsque la fraction fine a la capacité de circuler au travers de la structure porteuse d'un sol.
- L'érosion régressive de conduit est l'entraînement de particules à partir de l'exutoire qui crée une cavité qui va progresser vers l'amont, soutenue par une surface rigide ou cohésive;

régressive de conduit. L'érosion interne est à l'origine des désordres observés sur la plateforme et ses soutènements.

La zone d'anomalie s'étend sur un linéaire de digue d'environ 80 mètres. La zone principale d'infiltration est centrée sur une trentaine de mètres de part et d'autre de l'extrémité des murs en aile (flèche rouge sur la Figure 10). Par infiltration, des écoulements préférentiels à l'origine des fontis semblent passer à travers la plateforme, contournant sous les murs en aile puis se jeter dans les drains du mur de liaison (résurgence numéro 2 sur la Figure 10). D'autres écoulements semblent passer sur la digue à l'amont des murs en aile pour rejoindre le contre-canal (résurgence numéro 3 sur la Figure 10).

L'avancement de l'érosion interne au droit du PK 99.2 est estimé en phase « progression ».

En conclusion, il est d'urgent de stopper les importantes infiltrations à travers de la digue, l'origine de l'érosion interne et des désordres observées. Pour cela, nous nous orientons vers la mise en place d'une solution de confortement définitif de type paroi étanche ancrée dans le substratum relativement étanche (marne argileuse). Elle permettra de réduire considérablement la vitesse d'infiltration à travers de la digue et donc de supprimer le facteur déclencheur de l'érosion interne.

Travaux de confortement

Description des travaux

Les travaux de confortement de cette digue consistent en la mise en place d'une paroi étanche, de type paroi au coulis, dans le corps de digue. La paroi réalisée présente les caractéristiques suivantes :

- longueur de 100 ml, épaisseur de 0,6 m,
- la paroi traverse le corps de digue en graviers, les alluvions graveleuses, pour venir s'ancrer dans le substratum de marne argileuse, ce qui représente une profondeur d'environ 22 m.

Cette paroi vient se raccorder aux murs en aile amont barrage, ancrés à cette même profondeur.

Observations en phase travaux

Les différents incidents et observations répertoriés lors de l'excavation sont synthétisés ci-dessous (voir Figure 12) :

- Il n'y a presque pas de changement sur l'état de fuite à la sortie des drains du soutènement de la plateforme pendant les travaux PAC dans la zone amont.
- Dans la zone principale d'infiltration, les pertes de coulis avec résurgences dans le contre-canal via les drains et en

pied de digue ont été observées lors de l'excavation dans le corps de digue, vers 7-8 m de profondeur. Celles-ci ont été constatées sur 4 plots, soit près de la moitié du linéaire de cette zone.

- Lors de la réalisation de la paroi dans cette zone, la fuite a été fortement diminuée puis s'est tarie une fois la paroi de la zone terminée. Le traitement des pertes de coulis par big-bag de sable est efficace sous 10-15 minutes (pour un trajet d'écoulement de 40 - 45 ml environ).
- Dans la zone secondaire, les pertes de coulis ont été constatées sur 3 plots situés proches de la zone sensible sans résurgence dans le contre-canal. Une surconsommation de coulis y est importante par rapport au volume théorique, de l'ordre de 150 %.

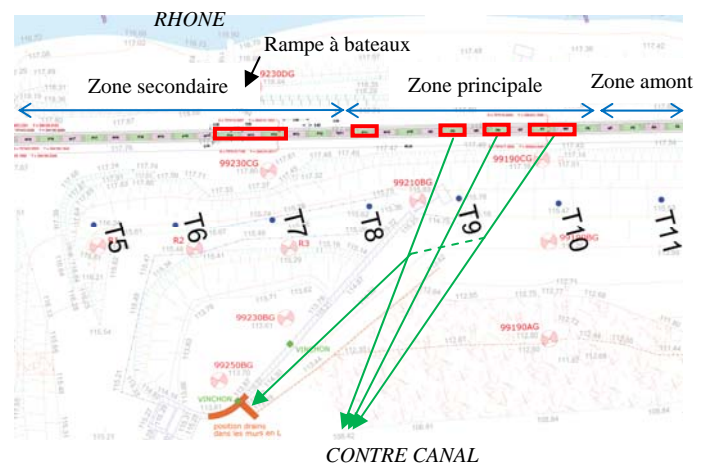


FIGURE 12 : VUE EN PLAN DES PLOTS AVEC PERTE DE COULIS EN ROUGE - EN VERT, DES COMMUNICATIONS SUPPOSEES ENTRE PLOTS ET CONTRE-CANAL SUIVANT OBSERVATIONS

Rétro-analyse de l'incident – Retour d'expérience sur les reconnaissances

Les observations pendant les travaux confirment que :

- il existe une zone principale d'infiltration à travers la digue et des zones secondaires d'infiltration. La profondeur des infiltrations est vers 7-8 m sous la crête de digue,
- les fuites dans les drains sont principalement alimentées par les infiltrations à travers la digue au niveau de la zone sensible.

Ces observations confirment la conclusion du diagnostic : **le ciblage de la zone principale d'infiltration et les écoulements préférentiels à l'origine de l'érosion interne.**

Concernant les reconnaissances utilisées lors de diagnostic, les deux méthodes, géophysique et thermométrique, ont permis d'identifier la zone d'anomalie avec une étendue sur un linéaire de 50 ml (géophysique) et de plus 80 ml de digue (thermométrique). Cependant, aucun de ces deux procédés

n'a permis de cerner plus précisément la zone principale d'infiltration. Cette zone a pu être identifiée lors du diagnostic par le clapage de limon sur le talus amont de digue.

Bien que le clapage de limon ait pour but d'améliorer la stabilité de la digue par un colmatage des infiltrations, les résultats obtenus pourraient être interprétés comme un essai grandeur nature. En effet, l'analyse du comportement de l'ouvrage suite au clapage nous a permis de cerner la zone principale d'écoulement à travers la digue.

La vitesse d'écoulement dans la digue estimée par la méthode thermométrique est inférieure à celle observée in situ d'un ordre de grandeur : 10^{-3} m/s contre 5×10^{-2} m/s environ. Cette dernière est cohérente avec le phénomène de transport de fines observé et la vitesse d'initiation d'érosion de la littérature [1].

Malgré ces limites, les résultats obtenus avec ces deux méthodes géophysique et thermométrique sont pertinents pour dimensionner le confortement de l'ouvrage.

Conclusions

L'incident de l'endiguement au PK 99.2 est caractérisé par un suivi de long terme sur un ouvrage en charge permanente, soumis à érosion interne.

Les mesures piézométriques et les suivis visuels restent adaptés et indispensables pour suivre l'évolution du phénomène et planifier son confortement.

Le clapage de limon sur le talus amont a montré son efficacité sur une digue en graviers. Cependant, les résultats sont très sensibles aux granulométries des matériaux mis en place et à la vitesse d'écoulement dans la retenue lors de la mise en œuvre (idéalement sans vitesse d'écoulement dans la retenue). Cette dernière condition dépend de l'exploitation de la retenue (conditions de débit avec nécessité d'ouverture du barrage). Dans notre cas, la répétitivité des résultats n'est pas observée lors de la deuxième campagne en utilisant un autre stock de matériaux.

Les méthodes géophysique et thermométrique, connues et utilisées depuis plusieurs années, restent intéressantes car elles permettent d'identifier assez précisément les anomalies d'infiltration à travers l'ouvrage. Cette information est utile pour le dimensionnement du confortement. Un suivi après travaux permet de confirmer l'efficacité des travaux.

Références

[1] CIGB ICOLD (2015), Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundation, Bulletin 164- Volume 1, Internal erosion processes and engineering assessment.

[2] DEROO L. FRY J.-J. Projet national ERINOH Thème H Erosion interne – Approches et besoins en matière d'ingénierie, Juillet 2014.

[3] GARANDET et al (2012) : Approches comparées de la thermométrie et des mesures de résistivité pour caractériser les écoulements d'une digue, pp 242-255, Colloque CFBR, Chambéry, 2012