

Conception et installation d'un système de surveillance innovant pour des digues de protection contre les crues du Rhône

Design and installation of an innovative surveillance system for flood protection dikes along the Rhone River

C. Guidoux¹, T. Mallet², J-R. Courivaud³, D. Chaussée⁴

¹geophyConsult, Chambéry, cyril.guidoux@geophyConsult.com

²SYMADREM, Arles, thibaut.mallet@symadrem.fr

³EDF, Le Bourget du Lac, jean-robert.courivaud@edf.fr

⁴SUEZ Consulting, Aix en Provence, denis.chaussee@suez.com

Résumé

Dans le cadre de son programme de confortement des digues de protection contre les inondations du Rhône aval, le SYMADREM a confié à SUEZ Consulting les études et travaux de confortement de la digue de 13 km en rive droite du Rhône entre Beaucaire et Fourques (Gard). Pour pallier le risque d'érosion interne mis en évidence par le diagnostic de sûreté, un programme de confortement structurel de l'ouvrage a été engagé, visant à renforcer principalement les fonctions d'étanchéité, de filtration et de drainage. Étant donné les enjeux de sûreté de la digue, le SYMADREM a souhaité compléter ce confortement par un renforcement du dispositif d'auscultation ayant pour objectif de détecter précocement – en situation de crue du Rhône – l'apparition de fuites à travers la digue, puis de surveiller leur évolution le long de la digue. La solution technique retenue est la technologie de détection des fuites par mesures passives de température par fibre optique proposée par EDF et geophyConsult. Après présentation des objectifs du système d'auscultation et des principales caractéristiques du projet de digue confortée, l'architecture générale du système de surveillance est présentée. La position de la fibre optique au sein de l'ouvrage est justifiée à l'aide d'une modélisation numérique aux éléments finis permettant i) de représenter les défauts que l'on souhaite être en mesure de détecter, ii) de simuler l'influence de ces défauts sur les paramètres d'écoulements internes et sur la température au sein de l'ouvrage et de sa fondation et iii) de justifier la capacité de la méthode à détecter les défauts recherchés. Les principales caractéristiques techniques du système de surveillance par fibre optique sont ensuite décrites, ainsi qu'un retour d'expérience exhaustif du terrain.

Mots-Clés

Surveillance temps réel, érosion interne, crue, confortement, mesures de température réparties

Abstract

As part of its program to enhance the protection of its dikes against flood, SYMADREM has charged SUEZ Consulting to carry out studies and reinforcement works on the 13 km long dikes along the right bank of the Rhône between Beaucaire and Fourques (Gard, France). To mitigate the internal erosion risk highlighted by the safety diagnosis, a structural reinforcement of the structure has been initiated, mainly aimed at strengthening the sealing, the filtration and the drainage functions. Given the importance of safety, SYMADREM has decided to reinforce the monitoring system and to equip it with technologies able to early detect – in flood conditions – first signs of leakage, and to monitor their evolution along the dike. The technical solution proposed by EDF and geophyConsult is based on passive optical temperature measurements. After presenting the objectives of the monitoring system and the main features of the reinforcement project, the general architecture of the monitoring system is presented. The position of the optical fiber is justified based on finite element numerical modelling allowing i) to represent the defects that are targeted, ii) to simulate the influence of these defects on the parameters that control the internal flow parameters and the temperature in the structure and below and iii) to justify the ability of the method to detect the targeted defects. The main characteristics of the fiber optic monitoring system are then described, before a comprehensive feedback from the field is listed.

Key Words

Real time monitoring, internal erosion, flood, strengthening, distributed temperature measurements.

Introduction

L'opération de renforcement de la digue du Rhône en rive droite entre Beaucaire et Fourques (département du Gard) s'inscrit dans le cadre global de mise en œuvre des programmes de gestion du risque d'inondation du Plan Rhône [1], dont les objectifs ont été déclinés par le SYMADREM en une méthodologie de mise en œuvre des actions aboutissant à l'établissement d'un programme de sécurisation des ouvrages de protection contre les crues du Rhône du Barrage de Vallabrègues à la Mer. Dans ce contexte de travaux, le SYMADREM a souhaité étudier la pertinence et la faisabilité du déploiement d'un système de surveillance par fibre optique destiné à la détection précoce d'écoulements dans l'ouvrage en cas de chargement exceptionnel de celui-ci. En effet, la mesure de température constitue aujourd'hui l'une des mesures les plus pertinentes pour détecter la présence de fuites au sein d'ouvrages en terre, permettant de compléter la surveillance du comportement hydraulique assurée à ce jour par une instrumentation classique ([2], [3] et [4]).

L'objectif du présent article est de décrire la conception et la mise en œuvre de la solution technique proposée par EDF et geophyConsult.

Contexte du projet

Trois types de digues sont prévus dans le programme de sécurisation :

- des digues résistantes à la surverse calées à une cote, dite cote de protection, dont le linéaire est estimé toutes rives confondues à environ 25 km,
- des digues dites millénales calées 50 cm au-dessus du niveau d'eau atteint par la crue exceptionnelle, dite crue de sûreté, et dont le linéaire est estimé toutes rives confondues à environ 195 km,
- des digues de protection rapprochée, appelées également digues de 2^e rang, au droit des zones à enjeux sensibles.

Le programme de sécurisation a fait l'objet d'un découpage en 14 opérations, dont 4 entre Beaucaire et Arles, parmi lesquelles le renforcement de la digue entre Beaucaire et Fourques, à l'exception du Site-Industrialo-Portuaire de Beaucaire, qui comprend notamment les ouvrages et aménagements suivants :

- renforcement de la digue sur le tronçon principal sur 13 km (du lieu-dit le Fer à Cheval au PK 272.3 à la station de la Tourette au PK 284.5), sur lequel se focalise le présent article ;
- déplacement du canal d'irrigation de la plaine de Beaucaire ;
- raccordements sur les ouvrages connexes et traitement des singularités : station de la Tourette, maisons de garde digue, traversée de routes

nationales et départementales, prise d'eau BRL, écluse de Beaucaire, prise d'eau du canal des Italiens, réseaux existants, ponts et voiries existantes, etc.

Le tronçon principal est découpé en trois segments (Figure 1) :

- Tronçon B : digue millénales entre le pont suspendu à Fourques et la station de la Tourette,
- Tronçon C : digue résistante à la surverse du Fer à cheval à la prise d'eau BRL,
- Tronçon D : digue millénales entre la prise d'eau BRL et le pont suspendu à Fourques.



FIGURE 1 : TRONÇONS COMPOSANT LE LINEAIRE DE DIGUE A RENFORCER (TRONÇONS B, C ET D)

Présentation des ouvrages

La digue projetée comprend les différents composants suivants (Figure 2) :

- un corps de digue et une clé d'étanchéité en remblai étanche (matériaux A1/A2 au sens du règlement technique GTR 2000),
- un complexe filtre-drain en aval du remblai étanche (géotextile + matériau drainant),
- une recharge aval :
 - o en remblai de matériaux tout-venant dans le cas de la digue millénales,
 - o en enrochements liaisonnés au béton avec une poutre en crête, dans le cas de la digue résistante à la surverse ;
- un parement en terre végétale ensemencée,
- trois pistes de circulation de 4,5 m de large : une piste en crête et deux pistes en pied de part et d'autre de la digue.

Les pentes de l'ouvrage finalisé sont de 2,2H/1V côté Rhône et de 2,5H/1V côté val (Figure 2).

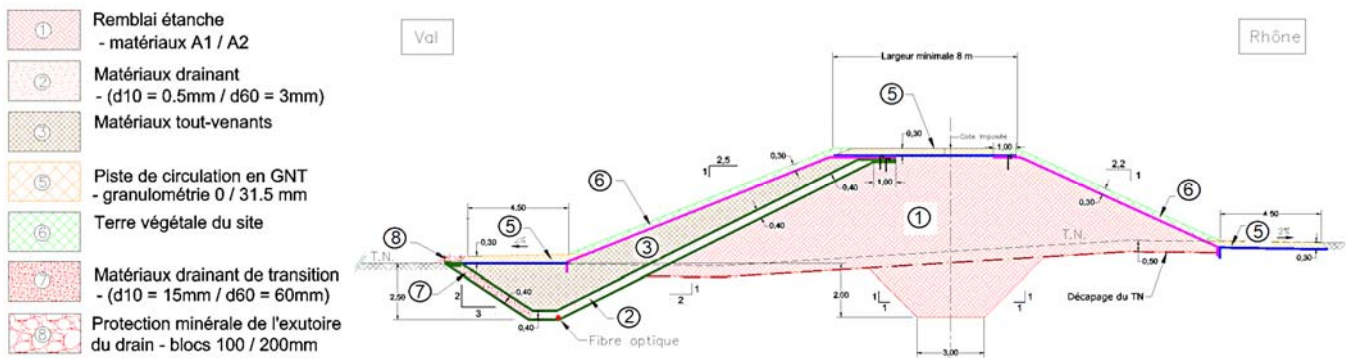


FIGURE 2 : COUPE-TYPE DE LA DIGUE MILLENALE (SOURCE : SYMADREM)

Application des mesures réparties de température à la surveillance des ouvrages

Les capteurs à fibre optique présentent de forts atouts technologiques, en particulier une grande sensibilité à des phénomènes physiques variés liés aux besoins de surveillances (température et déformation), le tout avec des performances métrologiques fiables dans la durée qui permettent à la fois des mesures ponctuelles (mesure en un point unique), distribuées (mise en série de diverses mesures le long de la ligne optique – c'est le cas des réseaux de Bragg) ou réparties (mesures en tout point de la ligne optique) sur de grandes longueurs de câble optique.

Les interrogateurs optoélectroniques disponibles sur le marché actuellement permettent d'obtenir une mesure de température tous les mètres, avec une portée allant jusqu'à 20 km. Pour cette portée d'interrogation, la précision de mesure de température constatée est de l'ordre de 0,1 °C, sous réserve de mesure intégratrices d'une durée de 30 à 60 minutes.

Parmi les méthodes disponibles pour appliquer ces technologies à la surveillance des ouvrages, la mesure passive de température – qui consiste à détecter les variations naturelles de la température de l'ouvrage en fonction du temps, afin de localiser dans les profils mesurés une anomalie de température induite a priori par la présence d'un écoulement (Figure 3) – représente la technique la plus largement déployée ces dernières années [4].

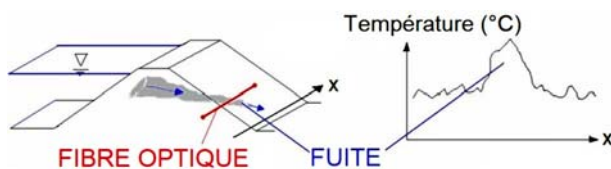


FIGURE 3 : PRINCIPE DE DETECTION DE FUITE PAR MESURE PASSIVE DE TEMPERATURE [4]

L'interprétation des données brutes nécessite une bonne connaissance de l'environnement de l'ouvrage (températures du fleuve et de l'air, hauteur de la nappe, etc.) et requiert l'application de méthodes physico-statistiques de traitement

des données. Parmi ces méthodes se trouve la méthode AJOUT (pour Analyse JOURNALIÈRE de Température) – développée par EDF – qui repose sur la décomposition en valeurs singulières de la matrice des données de température relevées par fibre optique, corrigées pour chaque jour de mesure ([5], [6]). Un paramètre de détection est calculé chaque jour et chaque mètre tout le long de la fibre optique sur les tronçons homogènes de mesure. La méthode s'applique aux jeux de données courts (1 jour minimum), sous réserve que l'on dispose de 12 mesures/jour minimum, comme à des séries chronologiques plus longues (semaines, mois, années). Elle est de ce fait parfaitement adaptée à la problématique de surveillance en crue.

Objectifs du système de surveillance

Objectifs généraux

Les objectifs fixés par le SYMADREM concernant le dispositif d'auscultation continue par fibre optique sont :

- détecter précocement des fuites potentiellement évolutives en période de crue et par tout temps,
- détecter des signes précurseurs de défaillance potentielle du complexe filtre/drain,
- localiser de façon précise la position de ces fuites ou de défaillance sur le linéaire de digue auscultée,
- réduire au plus bas possible le risque résiduel de brèche après travaux et bien entendu augmenter la capacité d'intervention du SYMADREM.

Le dispositif d'interprétation des données recueillies doit permettre de distinguer sans ambiguïté et en tenant compte de la présence du complexe filtre/drain :

- les infiltrations à surveiller sans vigilance particulière,
- les fuites à surveiller avec une vigilance particulière,
- les fuites évolutives nécessitant une intervention d'urgence, susceptibles d'être associées à une défaillance du complexe filtre/drain.

Architecture générale

Le mode de rupture (résiduel, du fait des travaux engagés) principal de la digue rive droite entre Beaucaire et Fourques

est l'érosion interne avec, comme modes d'initiation, l'érosion de contact, l'érosion de conduit ou l'érosion régressive. Le système d'auscultation a donc été conçu de manière à renseigner le maître d'ouvrage en temps réel sur le comportement hydraulique des ouvrages à court terme au travers des données suivantes :

- des mesures de température par fibre optique qui renseigneront sur la localisation de suspicions de fuites au sein de l'ouvrage ou de sa fondation. Cette information constitue une donnée d'entrée importante pour évaluer le risque d'érosion interne ;
- des mesures de niveau d'eau dans le Rhône à l'amont et à l'aval de la zone de travaux, qui permettent d'alerter sur des niveaux de chargement hydraulique exceptionnels ;
- une mesure de la température du Rhône au droit de la station de pompage de la société BRL [9] ;
- deux mesures de la température de la nappe, mises en place dans des piézomètres réalisés dans le cadre de la création de marres le long du tracé de la digue côté val (PK 274.11 et 282.2) ;
- une mesure de température de l'air, située au siège du SYMADREM, en Arles (soit à une distance moyenne de 10 km de la digue instrumentée).

Ces mesures constituent toutes des données d'entrée des logiciels d'analyse des données en temps réel, et sont télétransmises au moyen de la connexion radio numérique disponible le long des ouvrages depuis 2014.

Mesures de température réparties par fibre optique

Le système d'auscultation par fibres optiques doit permettre d'intercepter, sur la totalité du linéaire instrumenté, aussi bien les fuites affectant le corps de digue (érosion de conduit, érosion régressive), que les fuites consécutives à des phénomènes d'érosion de contact affectant la fondation.

L'expérience d'EDF et *geophyConsult* en la matière (portant sur des ouvrages comparables) montre qu'a priori, une seule fibre optique localisée en pied de talus aval de la digue, au point bas de la couche drainante (Figure 2), est a priori suffisante pour localiser l'ensemble des fuites qui pourront avoir un impact significatif sur la sûreté de cet ouvrage. Cet avis est étayé par le fait que les fuites traversant l'ouvrage pourront provenir soit de conduits à travers la zone étanche du corps de digue, soit de circulations à l'interface entre la base du remblai et la fondation. Dans les deux cas, ces fuites devront être collectées par la partie inférieure de la couche drainante. Cette justification de principe ne concerne cependant que l'aspect hydraulique du problème, et l'emplacement du câble optique a dû aussi être justifié en phase de conception pour son aptitude à détecter les anomalies thermiques attendues. En effet, la détection d'une fuite n'est assurée par le système de mesure que si le contraste thermique induit par la fuite est suffisamment fort pour être mesuré par les appareils de mesure actuellement disponibles sur le marché.

Conception du système de surveillance

Méthodologie de conception

La faisabilité de l'instrumentation de surveillance des fuites par fibre optique a été testée par la mise en œuvre de modèles thermo-hydrauliques de profils représentatifs de l'ouvrage selon la technique des éléments finis, dans le but de vérifier qu'une augmentation du débit passant dans l'ouvrage et/ou dans sa fondation est effectivement détectable au moyen de la mesure de température par fibre optique. Le profil représentatif modélisé a correspondu à la coupe type représentative de l'ouvrage millénal (Figure 2). Les modélisations ont été réalisées avec le logiciel COMSOL Multiphysics [10], qui permettait de reproduire le couplage thermo-hydraulique existant dans l'ouvrage, et ainsi de connaître la variation de température induite en tout point du sol en cas de défaillance de l'ouvrage.

La capacité de la méthode AJOUT à détecter la fuite dans chaque scénario a été testée en fournissant au code AJOUT des données de température issues des modélisations à l'emplacement exact où il était envisagé d'installer la fibre optique (Figure 4).

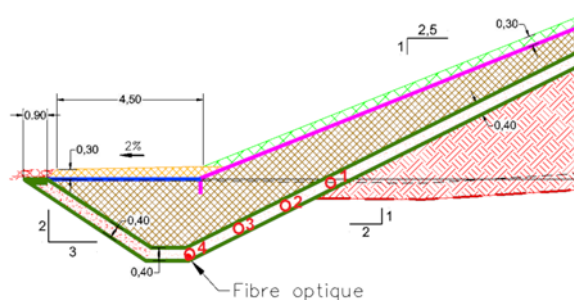


FIGURE 4 : EMBLEMES POTENTIELS POUR LA FIBRE OPTIQUE DANS LA COUCHE DRAINANTE

Modélisations thermo-hydrauliques

Le modèle numérique a été défini comme suit :

- les conditions aux limites hydrauliques appliquées sur la partie amont des modèles étaient constituées par une charge variable, reproduisant la cote du limnigramme de la crue de décembre 2003 (Figure 5),
- les conditions aux limites thermiques étaient les températures de l'eau du Rhône et de l'air, entre le 1^{er} octobre 2003 et le 31 décembre 2003,

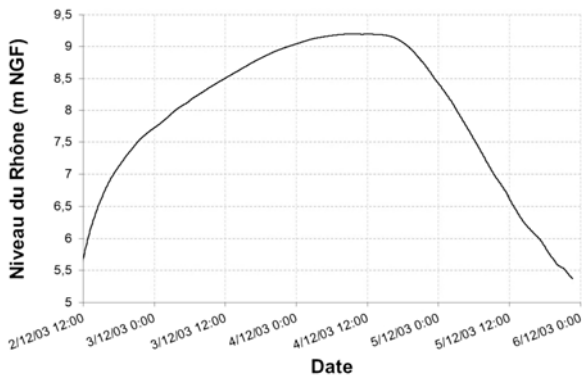


FIGURE 5 : NIVEAU DU RHONE LORS DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003

Le pic de crue a été calé sur la date du 4 décembre 2003. Le choix de cette crue est conservatif vis-à-vis de l'objectif de détection des fuites. En effet cette crue possède une dynamique rapide, sollicitant peu de temps l'ouvrage, ce qui constitue une situation peu favorable à la détection de fuite. Ainsi, si les fuites induites par cette crue sont détectables, les fuites induites par des crues plus lentes le seront nécessairement. En effet, à contraste thermique équivalent entre l'eau du Rhône et le sol constitutif de la digue et de sa fondation, la détectabilité de la fuite par les méthodes thermométriques est fonction essentiellement de deux paramètres :

- la vitesse de la fuite vue par la fibre optique (plus celle-ci est élevée et meilleure est la détectabilité) ;
- l'écart de température entre l'eau du Rhône et le sol constitutif de l'ouvrage (plus cet écart est élevé et meilleure est la détectabilité).

Si l'écart thermique entre l'eau du Rhône et le sol constitutif de l'ouvrage ne dépend pas de l'intensité de la crue, en revanche, la vitesse de fuite au sein de la digue sera plus forte pour une crue millénaire que pour la crue de décembre 2003. En conséquence, la détectabilité de fuites sera meilleure pour une crue millénaire que pour la condition de chargement prise en compte dans cette étude.

Le modèle géométrique de la digue a été construit à partir du levé topographique du PK 277,500. Ce profil correspond au profil type de la digue non-submersible après renforcement sur le tronçon de travaux D. Il a été choisi en raison de sa grande dimension, en particulier par rapport à celle du profil type de digue résistant à la surverse, qui subit des gradients hydrauliques – et par conséquent des vitesses d'écoulement – plus importants : si les fuites sont détectables sur ce modèle de grande digue, elles le seront nécessairement sur des tronçons de digue de dimensions inférieures.

Scenarii de défaillance et de chargement

Trois scenarii ont été modélisés :

- un scenario sans défaut (de référence) ;
- un scenario avec une fuite à l'interface remblai/talus naturel nécessitant une vigilance particulière, avec

une vitesse d'écoulement maximale de l'ordre de 10^2 m/s. Cette valeur correspond au seuil d'initiation d'une érosion interne d'après l'état de l'art concernant cette pathologie ;

- un scenario avec une fuite à l'interface remblai/TN ne nécessitant pas de surveillance particulière, avec une vitesse maximale d'écoulement sensiblement plus faible que le seuil d'initiation de l'érosion interne, mais néanmoins plus importante que la vitesse maximale d'écoulement pour une digue sans défaut (de l'ordre de 10^{-7} m/s). La vitesse maximale retenue était alors de l'ordre de 10^{-4} m/s.

Le tableau 1 présente les caractéristiques des éléments utilisés pour modéliser les scenarii de modélisation de l'ouvrage. L'extension verticale des zones d'érosion est de 50 cm dans tous les cas.

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES DES DEFAUTS MODELISES

| Modèle | Perméabilité horizontale de la zone de fuite ($m \times s^{-1}$) | Vitesse de Darcy maximale dans la fuite ($m \times s^{-1}$) |
|--|--|---|
| Sain | 1×10^{-6} | 2×10^{-7} |
| Fuite sans danger | 8×10^{-4} | 1×10^{-4} |
| Fuite susceptible d'initier une érosion de contact | 5×10^{-2} | $9,8 \times 10^{-3}$ |

Afin de représenter de la façon la plus réaliste possible des données issues d'un appareil de mesure par fibre optique, les résultats de modélisation ont été présentés sous la forme d'un linéaire fictif mesurant 100 m, soit 100 points de mesures. Il représentait un tronçon homogène sain dans lequel étaient incluses deux sections affectées d'un défaut engendrant respectivement une vitesse de Darcy maximale de l'ordre de 10^{-4} et $10^{-2} m \times s^{-1}$, disposées arbitrairement à 30 et 70 mètres, et représentant chacune un linéaire de 1 m (Figure 6).

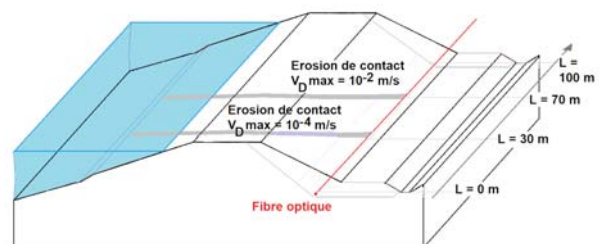


FIGURE 6 : LINEAIRE FICTIF D'OUVRAGE MODELISE

Un bruit aléatoire de mesure de $\pm 0,05$ °C, représentatif du bruit de mesure attendu en cas de mesures réparties par fibres optiques (le bruit prenant aléatoirement et uniformément, spatialement comme temporellement, toutes les valeurs de

l'intervalle réparti entre $-0,05$ et $0,05$ °C), a été appliqué à l'ensemble des données pour les rendre représentatives des mesures typiquement obtenues in situ sur des systèmes semblables.

Validation de faisabilité et optimisation du positionnement de la fibre optique

Les champs de température au moment du pic de crue pour la section de digue sans défaut et pour la section de digue affectée d'une zone d'érosion avec une vitesse de 10^{-4} m/s sont représentés Figure 7. La comparaison des deux sections montre clairement l'effet de la fuite sur le champ de température.

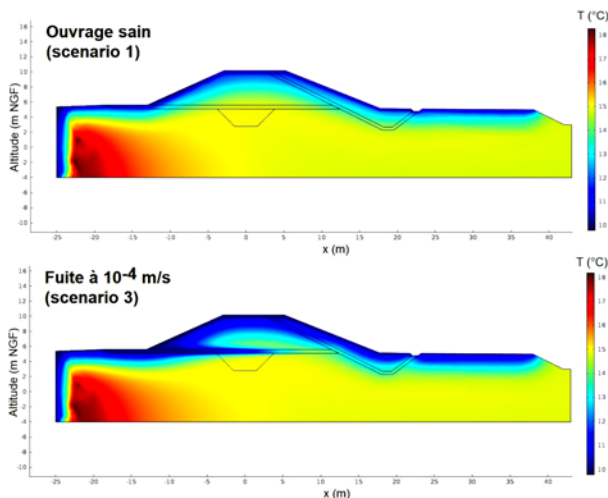


FIGURE 7 : REPARTITION DES TEMPERATURES DANS LES SECTIONS MODELISEES DURANT LE PIC DE CRUE

Les écarts maximaux de température sont supérieurs à la résolution de mesure prévue pour le système de détection qui est de $0,05$ °C, ce qui signifie que la détection de fuite sur données brutes est possible à l'échelle de temps de la crue. Les variations journalières de température dans les deux scénarii de modélisation – de l'ordre de $0,1$ °C – sont également supérieures à la résolution de mesure prévue pour le système de détection. Cela rend possible l'utilisation de la méthode AJOUT sur les données, pour chaque jour de crue modélisé.

Il doit être noté que les températures de l'air et du Rhône sont très défavorables à la détection, puisque leurs valeurs moyennes journalières sont très proches : durant la crue de décembre 2003, les températures moyennes journalières du Rhône et de l'air étaient en effet respectivement de $10,83$ °C et $10,20$ °C.

L'ensemble des modélisations thermo-hydrauliques a permis de déterminer les températures le long des profils correspondants aux emplacements envisagés pour la fibre optique, en fonction du temps. La Figure 8 représente les températures calculées sur le profil en long du point de mesure n°4 (fond de bêche) du 02/12/2003 à 0h00 au

05/12/2003 à 0h00 et met en évidence une anomalie au droit des fuites lors de la crue, la fuite sans danger pour l'ouvrage étant moins visible et plus tardivement visible que la fuite pouvant initier une érosion interne.

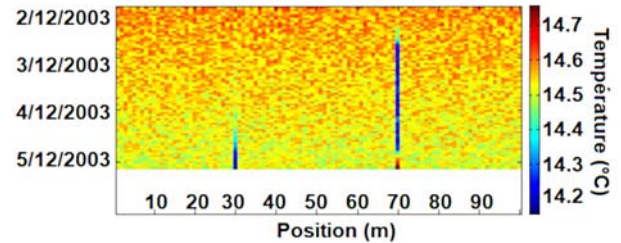


FIGURE 8 : REPARTITION DES TEMPERATURES DANS LES SECTIONS MODELISEES DURANT LA CRUE (FOND DE BECHE)

La Figure 9 représente le résultat de l'analyse AJOUT réalisée au même emplacement. Elle conduit à la même conclusion : les deux types de défaut sont bien localisés, et peuvent être discernés grâce à leur amplitude propre.

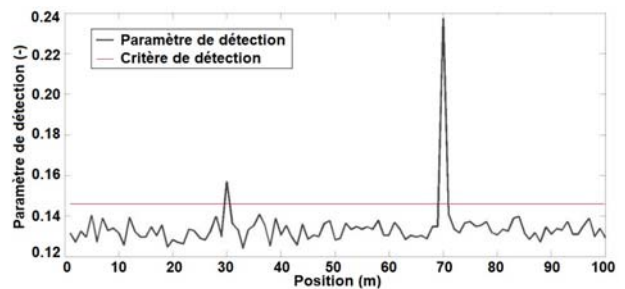


FIGURE 9 : ANALYSE AJOUT DES TEMPERATURES MODELISEES DURANT LE PIC DE CRUE EN FOND DE BECHE

Bien que les variations absolues de température soient plus importantes au niveau du point n°1, situé au plus près du débouché de la fuite (Figure 4), la discrimination entre les deux types de fuite recherchés (vitesse de Darcy à 10^{-4} m/s et à 10^{-2} m/s) est plus forte au niveau du point n°4 (fond de bêche). C'est donc ce positionnement en fond de bêche qui a été retenu.

Conclusion de l'étude de faisabilité

L'étude décrite dans le présent chapitre a conclu à la faisabilité de la détection de fuites recherchées soit par une visualisation des données brutes de température, soit par la méthode AJOUT, en utilisant des données caractérisées par un bruit de mesure assez bas ($\pm 0,05$ °C). Ces résultats montrent l'importance de disposer d'une installation optique finie d'une grande qualité, puisque le rapport signal/bruit d'une chaîne d'acquisition de température répartie dépend directement de l'atténuation du signal se propageant dans le câble de mesure. La possibilité d'atteindre une telle qualité a été démontrée sur les sites équipés de systèmes de surveillance comparables [8].

En dehors d'une planche de test destinée à valider la résistance mécanique des câbles optiques, aucun test en vraie grandeur n'a été planifié avant la mise en œuvre du système de surveillance car (i) la validité des modélisations a été démontrée sur les divers sites de même nature que celui du projet, équipés en fibre optique depuis 2010 [3] et (ii) des essais sur digue expérimentale ont été réalisés par le passé, en prévision du déploiement sur site réel ([11] et [12]).

Déroulement des travaux

Ce paragraphe décrit la méthodologie d'installation de la fibre optique, et le retour d'expérience acquis lors de cette installation, réalisée de mai 2017 à août 2018.

Composition détaillée du système de surveillance

Le système de surveillance est constitué, en ce qui concerne les mesures réparties de températures :

- d'un câble optique installé en fond de bêche, contre le talus aval de l'ouvrage, sur un géotextile et sous le matériau drainant (Figure 10). Ce câble contient des fibres optiques multimodes et monomodes afin de pouvoir faire évoluer le système en fonction de l'offre d'appareils d'acquisition ;
- de chambres de tirage permettant d'abriter des boîtiers de connexion optique assurant la continuité entre les divers tronçons de câble posés ;
- de sondes de température PT100 permettant le recalage du signal durant la vie de l'instrumentation. Ces boîtiers sont disposés à la jonction des tronçons de pose imposés par le phasage des travaux de génie civil, ainsi qu'au droit des points singuliers (ouvrages traversants, etc.) ;
- d'un appareil d'acquisition des données, installé dans une baie d'acquisition mise en place dans un bâtiment dédié situé entre les tronçons B et D. L'appareil est muni d'un multiplexeur permettant de le relier aux câbles installés sur les tronçons D et C (vers le Nord) et aux câbles installés sur le tronçon B (vers l'Ouest). L'alimentation de l'appareil de mesure est secourue par un ensemble de batteries permettant de maintenir la mesure durant 4 jours en cas de défaut du réseau ;
- de bobines d'étalonnage, installées aux extrémités des lignes optiques, et permettant de réaliser périodiquement la vérification des performances métrologiques du système ;
- de trois dispositifs d'étalonnage permettant l'injection d'eau à débit contrôlé dans l'ouvrage, mis en place dans le matériau drainant, à 1 m au-dessus des câbles, en trois emplacements représentatifs des ouvrages des zones B, C et D.

Les données issues du système de surveillance sont rapatriées sur un ordinateur de centralisation situé au SYMADREM, à une fréquence hebdomadaire en situation normale, et horaire

en crue.

Le système est associé à un logiciel de maintenance et d'exploitation du système d'auscultation et d'archivage des données permettant :

- d'effectuer des opérations de maintenance automatiques régulières qui vont aider le Maître d'Ouvrage à assurer le Maintien en Conditions Opérationnelles de son installation ;
- d'exploiter les données de mesures de température acquises pour détecter des fuites éventuelles durant les crues et archiver à long terme ces données.



FIGURE 10 : CÂBLE OPTIQUE EN COURS DE POSE EN FOND DE BECHE

Qualification des câbles

Afin de choisir le type de câble le plus adapté au mode de pose retenu, une planche d'essai a été réalisée en août 2016. Cette planche d'essai avait pour but de reproduire le chargement mécanique des câbles optiques imposé par le complexe filtrant drainant et la recharge aval de la digue de projet. Elle a été réalisée in situ, au moyen des mêmes matériaux que ceux employés dans les ouvrages projetés. Elle consistait en une tranchée de 10 m de long pour 2 m de profondeur et 5 m de largeur, avec des fruits de talus à 1/1. Les trois principaux types de câbles du marché ont été installés sur le géotextile en fond de fouille, puis recouverts de 60 cm de drainant 30/60 mm concassé. Le remblai a ensuite été réalisé en tout venant, compacté au rouleau par

passes successives de 60 cm à l'exception de la première passe, réalisée sur une couche de 10 cm.

La qualité optique des trois câbles a été contrôlée en continu durant la réalisation du talus. Aucun affaiblissement significatif de signal (i.e. supérieur à l'incertitude de l'appareil de mesure) n'a été constaté sur les câbles durant les essais. L'examen des câbles après le démontage de la planche d'essai n'a montré aucune trace d'endommagement de la gaine, exception faite des traces de pelles en bordure de planche, dues à l'impact du godet lors du démontage.

Le câble retenu à l'issue de ces essais est un câble télécom renforcé supportant une traction de 4 kN et possédant une résistance à l'écrasement de 400 N/cm.

Méthodologie d'installation

Le principe général d'installation a été gouverné par la nécessité de ne pas ralentir le génie civil. Les câbles optiques constituant le système de surveillance ont donc été posés à l'avancement de l'atelier de pose du drainant. Le câble a été déroulé au moyen d'un palan ou à la main, selon les cas (Figure 10). Cette méthodologie est propre aux installations réalisées dans le cadre de travaux de génie civil concernant les ouvrages ; dans le cas des ouvrages instrumentés sans intervention sur leur structure [8], l'utilisation d'une trancheuse est à privilégier.

Tout au long de la pose des câbles, une attention particulière a dû être apportée à la qualité optique des lignes en cours de pose, au moyen de contrôles réguliers de leur atténuation – ce qui constitue une opération classique pour les installateurs de réseau télécom. Ces opérations de contrôle ont nécessité qu'une extrémité du câble en cours de pose soit toujours accessible.

Des opérations de repérage (levé topographique et lecture des inscriptions métriques des câbles) ont été réalisées à l'avancement par le Titulaire des Travaux, afin de bien connaître le positionnement de chaque câble installé sur le terrain pour bâtir un plan de récolement exhaustif, indispensable à la bonne interprétation des données. Ces relevés ont été effectués sur une base hebdomadaire.

Une attention extrême a enfin dû être portée à la qualité des soudures permettant d'assurer la continuité du signal entre tronçons de pose adjacents, puisque les critères de réception de ces soudures étaient significativement plus exigeants que ceux habituellement employés dans les télécom (en particulier, les pertes de signal maximales admises au droit des soudures étaient 5 fois inférieures au critère télécom).

Cadence de pose

Le retour d'expérience a montré que la cadence de pose a été définie par l'atelier de mise en œuvre du matériau drainant et non pas par l'atelier de pose de la fibre. L'atelier de pose de la fibre a ainsi dû précéder l'atelier de pose du matériau drainant sans toutefois dépasser de plus de quelques dizaines de mètres ce dernier, afin de garantir que le câble serait maintenu rectiligne avant d'être enrobé dans le drain.

Contraintes de phasage

L'introduction de la fibre d'auscultation dans l'ouvrage a imposé une contrainte structurante dans le phasage de réalisation du filtre drain. En effet afin de limiter le nombre de soudures, source de dégradation du signal, les tourets présentaient des longueurs moyennes de l'ordre du kilomètre. La fibre étant posée sur le filtre et avant la mise en œuvre du matériau drainant, la construction du filtre drain a dû être réalisée de manière glissante, sur un tronçon de la longueur du touret et n'a pas pu être débutée simultanément en plusieurs points sur ce tronçon.

Gestion des points particuliers

Le passage de la fibre sous les ouvrages traversants dans leur partie drainée a dû être anticipé :

- dans le calepinage des tourets et des chambres de raccordement,
- dans la méthodologie et le phasage de construction de l'ouvrage traversant.

En effet, il convenait de prévoir, à quelques dizaines de mètres de chaque ouvrage traversant, une chambre de tirage. Les ouvrages traversants se trouvaient ainsi systématiquement en bout de touret, de façon que la fibre puisse passer sous l'ouvrage traversant, sans le touret, qui était trop encombrant. Le phasage de construction de l'ouvrage traversant a par ailleurs dû suivre l'une des 2 approches ci-dessous :

- la réalisation de la partie aval (filtre drain et recharge) était menée dans la continuité de la construction du filtre drain de section courante afin de suivre le déroulement de la fibre. Cette approche s'est révélée complexe dans le cas des ouvrages traversants de grande section, qui ne pouvaient pas être maintenus sans appui lors du creusement de la bêche aval drainante ;
- la réalisation de la partie aval (filtre drain et recharge) était menée en même temps que la partie amont traversant le corps de digue. Cette approche a nécessité la mise en place d'un fourreau non étanche (type drain annelé) de tirage de la fibre, dispositif qui a constitué une singularité dans l'environnement de la fibre d'auscultation qui doit être évitée autant que possible.

Critères de réception

Les aspects quantitatifs des critères de réception font partie du savoir-faire d'EDF et de *geophyConsult*. Il peut toutefois être ici précisé que la réception a reposé sur :

- la qualité optique des câbles après remblaiement (budget optique total, pertes d'insertion aux épissures et aux extrémités)
- la qualité du récolement permettant de localiser géographiquement chaque point le long des câbles installés.

Conclusion

Après avoir rappelé les objectifs du système d'auscultation ainsi que ses caractéristiques générales, le présent article a démontré la faisabilité technique d'un système de surveillance par fibre optique ayant pour objectif la détection et la localisation de fuites dans le remblai en situation de chargement exceptionnel. Les principaux résultats de l'étude de conception sont :

- la démonstration de la capacité du système à détecter et discriminer – en temps réel – des fuites caractérisées par une vitesse de Darcy allant de 10^{-4} m/s à 10^{-2} m/s, soit par une visualisation des données brutes de température, soit par la méthode AJOUT ;
- la fonctionnalité du système dans des conditions environnementales très défavorables (valeurs moyennes journalières des températures de l'air et du Rhône très proches) ;
- la nécessité de disposer d'une installation optique finie d'une grande qualité permettant d'atteindre les niveaux de rapport signal/bruit envisagés dans l'étude.

Le système ainsi défini a été mis en place avec succès durant les travaux de confortement des ouvrages de protection contre les crues en rive droite du Rhône entre Beaucaire et Fourques en 2017 et 2018. L'exploitation de ce système sera effective en 2019.

Compte tenu du succès de ce déploiement, l'installation d'un système de même nature sur la rive gauche du Rhône, entre Tarascon et Arles (Bouches-du-Rhône) est prévue pour 2019.

Remerciements

Les auteurs remercient tous les acteurs ayant travaillé et travaillant sur ce projet pour leur contribution dans l'élaboration de cette communication collective.

Références

- [1] <http://www.planrhone.fr/Inondations/Thematiques/La-strategie-prevention-des-inondations-du-Rhone>
- [2] Armbruster H., Dornstädter J., Kappelmeyer O., Tröger I. (1992). *Detection of seepage and flow phenomena by temperature measurements in soil*. Tracer hydrology: proceedings of the 6th International Symposium on Water Tracing, H. Hötzl, A. Werner (eds.), Balkema Verlag, Rotterdam
- [3] Johansson S. (1991). *Localization and quantification of water leakage in ageing embankment dams by regular temperature measurements*. Proceedings of 17th International Conference on Large Dams: "Environmental issues in dam projects", ICOLD, Vienna, Austria, 991-1005
- [4] Beck Y.-L., Courivaud J.-R., Guidoux C., Cassard A., Miceli J. (2015). *Retour d'expérience de la surveillance d'ouvrages hydrauliques en terre de long linéaire par capteur à fibre optique*. 25^{ème} congrès des grands barrages, Stavanger, juin 2015, Q98 – R11
- [5] Khan A.-A., Cunat P., Beck Y.-L., Mars J., Vrabie V., Fabre J.-P. (2010). *Distributed fibre optic temperature sensors for leakage detection in hydraulic structures*. Proceedings of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo
- [6] Khan A.-A. (2008). *A source separation technique for processing of thermometric data from fiber-optic DTS measurements for water leakage identification in dikes*. IEEE Sensors Journal, 8 (7), 1118-1129, DOI: 10.1109/JSEN.2008.926109
- [7] Bersan S. (2018). *Effectiveness of distributed temperature measurements for early detection of piping in river embankments*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 22, 1491–1508, 2018 <https://doi.org/10.5194/hess-22-1491-2018>
- [8] Guidoux C., Courivaud J.-R., Beck Y.-L., Beguin R. (2015). *80 km cumulative dikes of canal equipped with fiber optic monitoring systems: site experience feedback on the 4 past years*. TKZ2015, 29 Septembre 2015, Wierchomla, Poland
- [9] <https://www.brl.fr/fr/le-groupe-brl-7.html>
- [10] Version 4.2a, sans module pre-programmé. Les équations du problème ont été codées directement dans le logiciel.
- [11] Vedrenne Ch., Schatan B. and Guidoux C. (2007): Active and passive defences against internal erosion, Meeting of the European Working Group on Internal Erosion, 16-17 April 2007, Aix les Bains, France.
- [12] Guidoux C. (2006): Leak detection using optical fibre temperature measurements: Full scale field experiment with passive and active detection method, Meeting of the European Working Group on Internal Erosion, 11-12 Sep 2006, Stockholm, Sweden