

Projet « DIGUINTELLIGENT »

Recherche et développement d'une technologie de détection et de quantification d'écoulements dans les digues

“DIGUINTELLIGENT” Project

A new technology to detect and quantify flows within dikes

P. Chevrier¹, P. Coudray², P.A. Pezard³, D. Neyens⁴, J. Cousteau⁵

¹EGIS, Montpellier, paul.chevrier@egis.fr

²KLOE, Montpellier, coudray@kloe.fr

³CNRS, Montpellier, ppezard@gulliver.fr

⁴imaGeau, Montpellier, denis.neyens@imageau.eu

⁵NGE, Tarascon, jcousteau@nge.fr

Résumé

L'érosion interne, qui est définie comme l'entraînement progressif des particules constituant un ouvrage sous l'action de l'écoulement qui le traverse, est à l'origine d'un grand nombre de ruptures de digues. De 2012 à 2016, le projet DIGUINTELLIGENT a mis au point un système de surveillance des écoulements dans les ouvrages hydrauliques de type digue. Le système de surveillance visait notamment à réaliser un suivi intégré et continu de l'état hydrique des massifs, à localiser les écoulements anormaux et à tenter de quantifier les débits de fuite en temps réel.

Le projet vise plus largement à développer une stratégie opérationnelle de mesures intégrées permettant d'évaluer en temps réel les risques de rupture d'ouvrages, et à proposer une aide à la décision adaptée quant au déclenchement d'opérations de réparation. Le principe général est d'augmenter la réactivité des équipes de surveillance en cas de dysfonctionnement des ouvrages et de minimiser grandement les risques de rupture.

Le projet a consisté en la conception, le test sur un ouvrage expérimental et la validation d'un système innovant de surveillance d'une digue avec la conception d'un ensemble de capteurs expérimentaux parmi lesquels la fibre optique (réseaux de Bragg) pour la localisation des écoulements, des capteurs de potentiel électrique spontané (PES) pour la quantification des écoulements, la construction d'un site d'expérimentation grandeur nature, la mise en place d'un protocole de tests et l'analyse des résultats.

Après avoir exposé les principaux enjeux et objectifs du projet, l'article présentera la méthodologie appliquée pour la

conception du démonstrateur (réalisation d'une digue « neuve » et d'une digue « ancienne »), et la conception de l'instrumentation mise en place (réseaux de fibres optiques, capteurs de potentiel électrique spontané (PES), mesures de résistivité électrique). Dans un second temps, le protocole expérimental et les différentes manipulations seront décrits, avant de présenter les résultats issus de l'interprétation des données acquises lors des tests et de conclure avec les perspectives se dessinant à l'issue de l'expérimentation.

Mots-Clés

Fibre optique ; réseau de Bragg ; thermométrie ; méthodes électriques ; érosion interne.

Abstract

Internal erosion, which is defined as the progressive dyke particles migration with a water flow, is at the origin of a significant number of dikes ruptures. From 2012 to 2016, the aim of the DIGUINTELLIGENT project, was to develop a new monitoring system for flows within dike-type hydraulic structures. This monitoring system was developed in particular to perform an integrated and continuous monitoring of the water state of the dikes, to locate the irregular flows and to attempt to quantify the leak rates in real time.

The project aimed to develop an operational system of integrated measurements in order to assess, in real time, the breaches risk of structures, and to propose a decision support to trigger repair operations. The general principle is to increase the monitoring teams reactivity in case of structures malfunction and to significantly reduce the failure risks.

The project included the design, testing on an experimental structure and the validation of an innovative dyke monitoring system through the design of a set of experimental sensors. These included optical fiber (Bragg gratings) for flow localization, self potential (SP) sensors for flow quantification, the construction of a pluri dm-scale experimental site, the implementation of a test protocol and the results analysis.

After presenting the main objectives of the project, this paper presents the methodology applied for the experimental structure design (joint construction of a "new" and "old" dyke), for the instrumentation design (optical fiber networks, self potential (SP) and electrical resistivity sensors). In a second part, the experimental protocol and the different field experiments are described, before presenting the results and concluding with future opportunities.

Key Words

Optical fiber; Bragg sensors; thermometry; electrical methods, internal erosion.

Introduction

La fibre optique est utilisée depuis près de 30 ans dans la surveillance par thermométrie des forages. Depuis les années 1990, des expérimentations en laboratoire et en site réel sont mises en œuvre afin de tester différentes technologies de fibre pour la détection de fuites au sein d'ouvrages en remblai. Ces dernières années, des travaux ont également utilisé le potentiel électrique spontané (PES) comme moyen de détection des fuites dans les digues. Le projet DIGUINTELLIGENT a pour but d'évaluer conjointement sur le terrain et de manière expérimentale ces deux méthodes à l'aide d'expériences contrôlées réalisées à l'échelle de digues réelles. Le dispositif est complété d'un observatoire de résistivité électrique vertical, en forage, permettant de suivre le degré de saturation hydrique de l'ouvrage. La combinaison de ces trois types de mesures vise à permettre une analyse conjointe de la saturation en eau du milieu (résistivité électrique), de la température (fibre optique) et de la quantification de l'évolution des écoulements (potentiel électrique spontané).

Principe technique du système de surveillance visé et problématiques structurantes

Localisation d'écoulements par mesure de température par fibre optique équipée de réseaux de Bragg

Cette application repose sur le principe qu'un écoulement particulier à un niveau de l'ouvrage induit une variation locale de la température du milieu. L'analyse des écarts de température entre capteurs doit permettre de différencier les

régimes d'écoulement au travers de l'ouvrage et de localiser les événements particuliers. Le principe de surveillance opérationnelle envisagé à ce jour consiste donc à suivre la température au niveau d'une série de capteurs implantés dans une digue et d'associer aux fluctuations de leurs mesures respectives la localisation d'écoulements particuliers. Le choix s'est porté sur les réseaux de Bragg (technologie K-FBG). L'avantage de cette technologie réside dans le fait que l'affichage des variations de température avec un système de surveillance K-FBG ne nécessite pas de longs temps de traitement ou d'analyse statistique pour extraire l'information. Les données de températures sont directement fournies par les capteurs.

Quantification des écoulements par mesure du potentiel électrique spontané

Cette application repose sur le principe que la composante électrocinétique du potentiel électrique spontané (PES) d'un milieu poreux est associée aux écoulements des fluides dans ce milieu. La variation des écoulements entraîne une variation de cette composante. Le principe de surveillance opérationnelle envisagé à ce jour consiste donc à suivre le potentiel électrique spontané au niveau d'une série de capteurs implantés dans une digue et d'associer à leurs valeurs respectives une vitesse d'écoulement donnée. Contrairement à la mesure de température à laquelle est uniquement associée une information de localisation d'événement, cette application suppose que les mesures en temps réel puissent être comparées à une échelle de référence, donnant pour une valeur de PES, une vitesse d'écoulement associée.

Conception du démonstrateur

Dans le cadre du travail de conception du système expérimental, le démonstrateur a été conçu afin de répondre aux configurations d'ouvrages les plus adaptées à l'étude des phénomènes d'érosion visés.

Le dispositif expérimental prend la forme d'un bassin rectangulaire, formé par deux digues de structure et de matériaux différents. Les côtés les plus longs de ce bassin ont été construits selon des principes différents, de sorte à être représentatifs de deux grandes typologies d'ouvrage hydraulique :

- Un ouvrage étanche pouvant être apparenté à une digue neuve : digue composée de matériaux argileux compactés selon les objectifs de sécurité standards et constituée d'une clé d'ancrage. On se référera dans ce document à cette section du bassin sous le terme de « digue neuve »
- Un ouvrage à étanchéité limitée et plus représentatif d'ouvrages plus anciens et plus sensibles aux mécanismes d'érosion interne : digue composée de limons sableux fins compactés de manière hétérogène. On se référera dans ce document à cette section du

bassin sous le terme de « digue ancienne ».

Cette différence de matériau et de structure permet d'expérimenter la surveillance par fibre optique et par mesure de potentiel spontané dans des configurations physiques distinctes. L'alimentation en eau de ce bassin permet de générer une charge hydraulique identique sur les deux digues expérimentales. Les digues neuve et ancienne sont équipées de buses traversantes crépinées qui permettent de générer des écoulements contrôlés au travers des digues et ainsi de simuler des fuites.

Chacune des digues (DN et DA) est instrumentée avec 4 fibres optiques munies de capteurs de température (précision de l'ordre de $\pm 0,01$ °C). Les fibres n°1, 2, 5 et 6 (L1 et L2 pour DN, L5 et L6 pour DA) comportent 28 réseaux de Bragg de mesure de température chacune, et avec un espacement de 14 cm entre eux au plus près des drains. Les fibres n°3 et 7 (L3 pour DN et L7 pour DA) comportent 25 capteurs, avec un espacement de 20 cm entre eux au plus près des drains. La fibre n°7 est positionnée en pied de digue ancienne afin d'évaluer l'efficacité d'un tel positionnement qui pourrait résulter de travaux à la fois assez faciles à mettre en œuvre et ne mettant pas en danger l'intégrité d'un édifice ancien et a priori mal connu. Les fibres n°4 et 8 (L4 sur DN et L8 sur DA) enroulées autour des drains comportent chacune 9 capteurs de température. Cela donne un total de 179 capteurs pour le dispositif de surveillance des écoulements par mesures de température. Une période d'acquisition de 30 secondes est mise en place en continu, jour et nuit, aussi bien que pendant les expériences d'écoulement dans les drains.

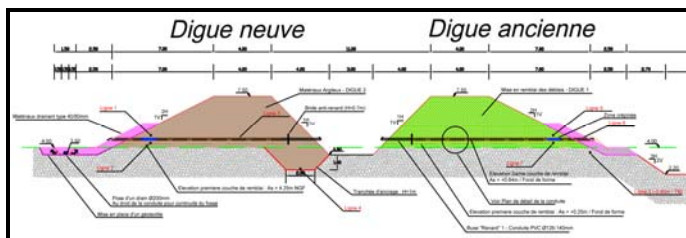


FIGURE 1: COUPE DE L'IMPLANTATION DES RESEAUX DE FIBRE LE LONG DES OUVRAGES

En pied de talus côté val, une ligne horizontale est enfouie pour chaque digue. Chaque ligne est équipée de 20 électrodes PES placées tous les 3 mètres et resserrées à 1,50 m autour des drains. L'électrode de référence assimilée à l'infini est placée dans le bassin secondaire (bassin de ressuyage des drains). La précision des capteurs est de $0,1 \mu\text{V}$. Les mesures sont effectuées en continu avec une période d'acquisition variant entre 20 ms et 4 s. Le dispositif est complété par la mise en œuvre de deux observatoires de résistivité électrique placés en forage et permettant un suivi de la saturation / désaturation du remblai et ainsi de vérifier la cohérence des mesures de température et de PES. Ces observatoires sont implantés dans chaque digue, à une distance d'environ 1 mètre des drains. L'espacement vertical des mesures est de 35 cm.



FIGURE 2 : VUE DU DEMONSTRATEUR CONSTRUIT EN ARLES

À l'issue de la construction du démonstrateur, des données de fonds, hors expérimentation, ont été acquises pendant la durée du projet afin de caractériser les composantes T° et PES de l'ouvrage, hors condition particulière de charge en eau et d'activation d'écoulements traversants artificiels. Ces données ont permis d'identifier les variations journalières de température du remblai.

Le protocole expérimental est défini de sorte à mettre en charge l'ouvrage au début de chaque journée d'expérimentation (mise en charge maximale de 1.60 mètres). Après mise en charge de l'ouvrage, les expérimentations sont réalisées en alimentant les drains par ouverture des vannes du bassin sur des périodes de 2 à 7 minutes. L'opération d'ouverture / fermeture des drains est répétée plusieurs fois au cours d'une même journée d'expérimentation. Le débit dans les drains varie de 0,05 l/s à 3 l/s.

Résultats et interprétation

Étude des mesures de PES

L'intégration des données de PES avant même le début des expérimentations met en évidence un bruit important sur le signal pour l'ensemble des données récoltées. Ces résultats suggèrent la présence sur le site de bruits industriels et / ou de courants telluriques [1] (expérimentation réalisée sur une zone d'entrepôt de matériaux, avec passage d'engins de chantier et d'industries à proximité). En cours d'expérimentation, un bruit plus important est observé lors de l'ouverture et fermeture des vannes des drains.

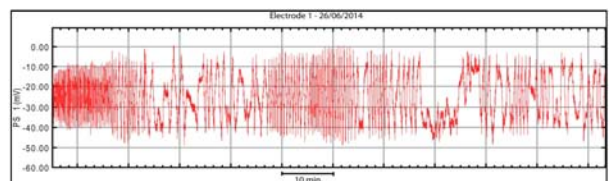


FIGURE 3: PRÉSENCE DE SIGNAUX PÉRIODIQUES DE FRÉQUENCES VARIABLES ALTERNES DE SIGNAUX PSEUDO ALÉATOIRES

Après traitement statistique des données collectées, il est observé que pour l'ensemble des journées expérimentales, le seuil de détection est atteint plus fréquemment lors de la circulation d'eau dans les drains. Les mesures de PES apparaissent comme sensibles aux écoulements, qu'ils soient forcés dans les drains ou d'origine plus naturelle lors d'une désaturation du remblai faisant suite à une forte pluie.

En synthèse, l'important bruitage des signaux n'a pas permis de filtrer précisément le signal dû aux écoulements de fluide qui aurait permis d'estimer la relation entre les données PES et les vitesses d'écoulement. Il est cependant observé des amplitudes de PES plus importantes au cours des phases d'expérimentation, offrant la possibilité de mettre en œuvre un traitement statistique des données.

Dans l'optique de mise en œuvre d'un programme de détection et d'alerte d'événements sur digue, une routine permettant de traiter les données PES de manière journalière a été développée. Un traitement statistique est effectué sur fenêtre glissante à partir des données issues de l'expérimentation sur une journée avec manipulation du drain n°1 (digue nouvelle). Le traitement est représenté sous la forme d'une carte spatio-temporelle représentant la distance en long des deux digues (en abscisse) et le temps (en ordonnées). Une corrélation spatiale et temporelle des signaux est détectée. La corrélation spatiale n'est toutefois pas aussi bonne que la corrélation temporelle.

La carte ci-dessous illustre les mesures réalisées au cours de la journée d'expérimentation du 25 juin 2014 (écoulements dans le drain n°1 entre 16h et 16h30). Le Drain n°1 est situé à une distance de 15 mètres de l'extrémité nord de la digue DN. La pastille verte indique la période expérimentale et comprend plusieurs expériences de courte durée.

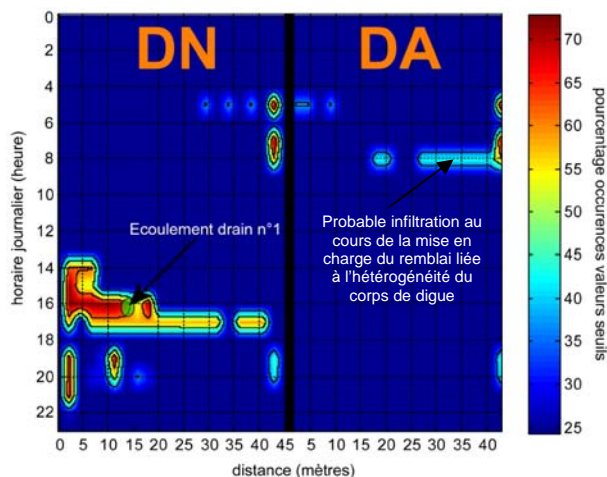


FIGURE 4 : CARTOGRAPHIE AU-DELÀ DES VALEURS SEUILS DES SIGNAUX RESIDUELS APRES TRAITEMENT DU BRUIT

Données de température

L'analyse des variations de température sur la période d'instrumentation met en évidence des variations de faible ampleur sur des fréquences étendues correspondant aux variations de température du remblai.

Au cours des différentes expériences réalisées, la sensibilité des capteurs de température par réseaux de Bragg aux écoulements apparaît clairement en réponse aux ouvertures des vannes à débit variable. On remarque par ailleurs la grande sensibilité de ces capteurs, avec un bruit de l'ordre de $\pm 0,01^\circ\text{C}$ en dehors des expériences d'écoulement dans le drain.

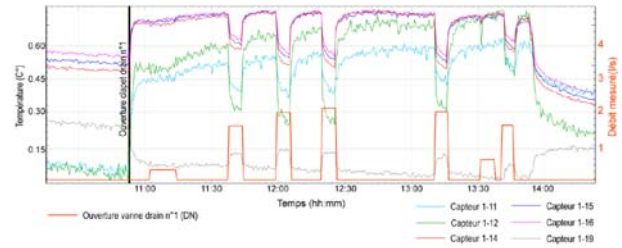


FIGURE 5 : CORELLATION ENTRE LES OUVERTURES/FERMETURES DE VANNES DES DRAINS ET LES VARIATIONS DE TEMPERATURE ENREGISTREES PAR LES CAPTEURS

Les anomalies de température sur la digue neuve (DN) sont localisées pour la ligne n°1 (située au-dessus du drain n°1) à proximité du Drain n°1 pour des écoulements de courte durée (5 minutes) qui donnent une anomalie maximum de 0.6°C . Les écoulements ont une influence spatiale sur la température de l'ordre de 4 mètres pour ces expériences de courte durée (5 minutes). On peut donc imaginer que pour des écoulements plus longs, de type « effet de renard », l'influence spatiale sera augmentée de quelques mètres, dépassant 5 mètres. Des expérimentations complémentaires permettraient de générer du retour d'expérience et ainsi de vérifier ce point.

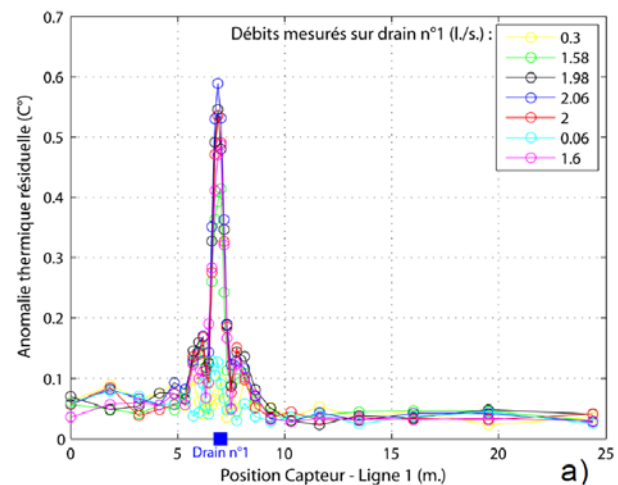


FIGURE 6: ANOMALIES DE TEMPERATURE MESUREES LE LONG DE LA FIBRE N°1 (AU-DESSUS DU DRAIN) SUR LA DIGUE NOUVELLE

En revanche, les anomalies détectées par L2 (situé en dessous du Drain n°1) sont décalées d'environ 2 mètres vers le nord par rapport à l'intersection avec le drain, ce qui pourrait être lié à la présence d'un écoulement préférentiel dans une fracture au sein du corps de digue et sub-parallèle au drain activé lors des l'expériences du 8 juillet 2014. Elles sont par ailleurs de plus faible amplitude que celles obtenues avec L1 ($\Delta T_{max} \approx 0.35 \text{ C}^\circ$) situé 20 cm au-dessus du Drain n°1.

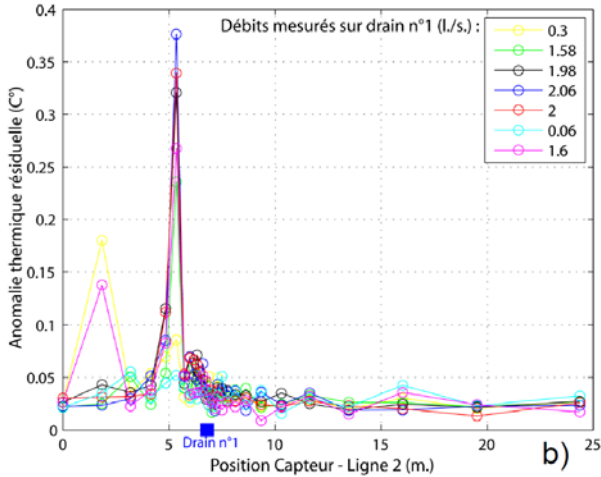


FIGURE 7 : ANOMALIES DE TEMPÉRATURE MESURÉES LE LONG DE LA FIBRE N°2 (EN DESSOUS DU DRAIN) SUR LA DIGUE NOUVELLE

Les anomalies de température mesurées le long de la digue ancienne sont beaucoup plus diffuses et bruitées que celles obtenues sur la digue nouvelle.

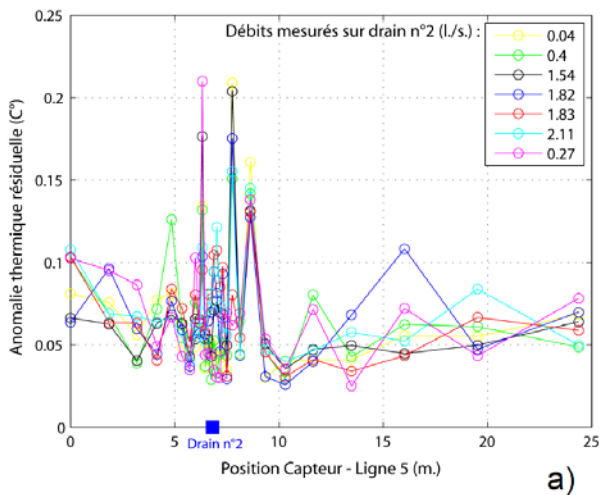


FIGURE 8: ANOMALIES DE TEMPÉRATURE MESURÉES LE LONG DE LA FIBRE N°5 (AU-DESSUS DU DRAIN) SUR LA DIGUE ANCIENNE

Les anomalies mesurées sur la ligne de fibres n°7, située en pied de talus côté protégé, sont clairement identifiables mais décalés de 2 m par rapport au drain. Ceci pourrait être lié à des cheminements préférentiels liés à l'hétérogénéité du

remblai de la digue ancienne.

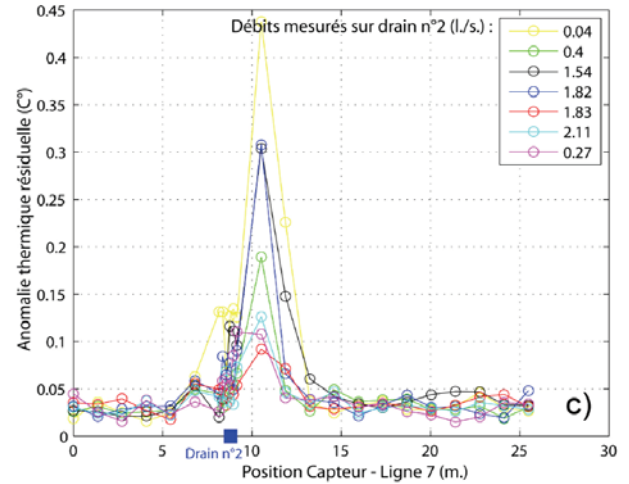


FIGURE 9: ANOMALIES DE TEMPÉRATURE MESURÉES LE LONG DE LA FIBRE N°7 SITUÉE EN PIED CÔTÉ PROTÉGÉ DE LA DIGUE ANCIENNE

Quantification des écoulements à partir de l'analyse des données de température

Une forte corrélation est mise en évidence entre débits mesurés dans les drains et anomalies maximales de température pour les fibres L1 et L2 (digue neuve), ainsi que pour les fibres L5 et L6 (digue ancienne). Aucune corrélation claire n'apparaît cependant pour la fibre L7 située en pied de la digue ancienne.

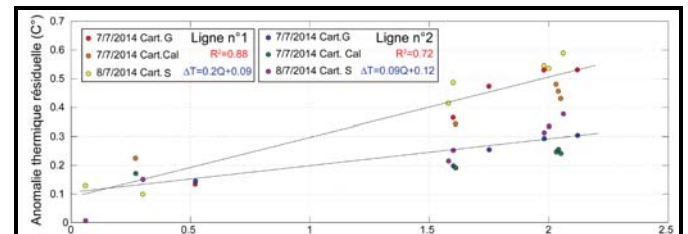


FIGURE 10: CORRÉLATION ANOMALIE DE TEMPÉRATURE/DÉBITS MESURES SUR LE DRAIN N°1

Conclusion

Les mesures de température permettent la mise en place d'un système de génération d'alertes spatiales et temporelles pour la surveillance des digues. Si les signaux PES ne permettent pas une quantification et une résolution spatiale précise, ils permettent une détection temporelle statistique des écoulements. L'expérimentation réalisée en Arles met en évidence la sensibilité des signaux PES aux bruits d'origine électromagnétique (d'origine naturelle ou industrielle). La pertinence de mettre en œuvre un dispositif de mesures PES est donc conditionnée par les caractéristiques du site. Par ailleurs, le traitement automatique complet des données

nécessiterait des travaux supplémentaires qui pourraient être pris en charge dans le cadre d'un programme de recherche et développement.

La thermométrie s'avère être une des mesures les plus pertinentes pour la détection de fuites au sein d'ouvrages en terre. La détection repose sur l'analyse de l'écart de température entre le corps de digue non-exposé à la fuite et le corps de digue exposé à la fuite. Dans le cadre de l'expérimentation réalisée en Arles, le monitoring des réseaux de Bragg met en évidence l'immédiateté de l'information de localisation de la fuite. Des expérimentations complémentaires permettraient de définir l'espacement optimal entre capteurs garantissant la captation d'une fuite sur des infrastructures à grand linéaire (digues). Par ailleurs, les résultats obtenus dans le cadre de l'expérimentation démontrent la pertinence de mettre en œuvre ce dispositif de manière plus ponctuelle, sur des ouvrages traversants ou des ouvrages de retenue de faible linéaire.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des collaborateurs s'étant investis sur le projet, et tout particulièrement Martin Perrot pour son travail de direction et d'animation du projet.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un appel à projets « Eco-industries » de la Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services (DGCIS).

Références

- [1] Corwin R.W. (1989). *Geotechnical Applications of the Self-Potential Method. Report 3. Development of Self-Potential Interpretation Techniques for Seepage Detection*. Technical Report REMR-GT-6, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.