

Démarche d'EDF au regard de l'utilisation des fibres optiques pour la surveillance des ouvrages hydrauliques. Validation de cette technologie lors des essais néerlandais ijkdijk d'érosion interne

EDF policy related to the use of fibre optics for the surveillance of hydraulic structure. Validation at the Dutch Ijkdijk piping tests

Jean-Robert Courivaud¹, Bernard Reverchon
EDF CIH Savoie Technolac 73373 Le Bourget du Lac Cedex
jean-robot.courivaud@edf.fr, bernard.reverchon@edf.fr

Yves-Laurent Beck
EDF DTG 21 avenue de l'Europe BP 41 38040 Grenoble
yves-laurent.beck@edf.fr

Jean-Luc Perriollat
EDF DPIH Site Cap Ampère 1, place Pleyel 93282 Saint Denis Cedex
jean-luc.perriollat@edf.fr

Patrick Pinettes
geophyConsult Savoie Technolac – 12, allée du lac de garde – B.P. 231 – 73374 Le Bourget du Lac Cedex
pinettes@geophyconsult.com

MOTS CLÉS

Sûreté, auscultation, barrage, canal, digue, remblai, fuite, déformation, béton.

RÉSUMÉ

Les mesures distribuées de température et de déformation par fibres optiques font l'objet, depuis plus d'une dizaine d'années, d'importants travaux de recherche et développement pour être appliquées à la surveillance des ouvrages hydrauliques. La capacité de ces fibres à mesurer de manière continue sur de grands linéaires (plusieurs dizaines de km) et en temps réel des températures au sein des ouvrages et de leur fondation permet d'envisager une surveillance précise des fuites dans les ouvrages hydrauliques en remblai et notamment dans les ouvrages de grand linéaire, comme les digues de canaux ou de protection contre les inondations. Cette caractéristique des fibres permet en outre une surveillance thermique des ouvrages en béton, afin d'améliorer le suivi de phases particulières du comportement du matériau (exothermie du béton et décroissance de la température au jeune âge) ainsi que les modèles de comportement long terme de ces ouvrages (barrages poids et voûte). D'autres recherches portant sur les mesures de déformation par fibre optique permettent d'envisager leur utilisation pour le suivi du comportement mécanique des remblais. EDF s'est engagée depuis 11 ans dans un programme de recherche sur le développement de ces technologies qui lui a permis de réaliser des installations expérimentales sur différents types d'ouvrages, de développer et valider une panoplie de modèles d'interprétation des données brutes et d'acquérir une expérience et un savoir-faire, en partenariat avec geophyConsult, dans la conception, la réalisation, la maintenance et l'exploitation des installations de surveillance par fibre optique. Actuellement, EDF s'engage dans un programme de déploiement progressif et conditionnel de cette technologie sur son parc d'ouvrages hydrauliques en remblai. Cet article présente les étapes de ce programme et le retour d'expérience acquis depuis 11 ans. Il présente également les résultats obtenus lors des essais in situ à grande échelle du projet néerlandais IJKDIJK de 2009.

ABSTRACT

Distributed temperature and strain measurements by fibre optics have been subject to intensive research and development for more than ten years for the monitoring of hydraulic structures. The ability of such fibres to measure temperatures continuously and in real time along long linears (several tens of km) inside the structure or its foundation enables to refine both in space and time the resolution of the monitoring, in particular for long linear structures, such as canal dykes or levees. This characteristic of the fibre optics also enables a thermal surveillance of concrete structures, in order to improve the monitoring of particular phases of the concrete behavior (concrete exotherm and

¹ Auteur correspondant

temperature decrease during young age) as well as long-term behavior modeling of the structure (gravity and arch dams). Other researches focusing on fibre optic strain measurements aim at monitoring, with a great spatial and time resolution, the mechanical behavior of embankment structures. EDF has been performing for about 11 years a research program aimed at applying these technologies to experimental installations on several types of structures, and at developing and validating a set of numerical models for the interpretation of raw data. This research has enabled EDF to acquire experience and know-how, in collaboration with geophyConsult, in the fields of design, realization, maintenance and operating of fibre optic based surveillance systems. Currently, EDF has started a progressive and conditional program of deployment of this technology on its own embankment structures. The present communication describes the various steps of this research program and summarizes the feed-back acquired after 11 years. It ends with the results obtained at the large scale piping tests of the Dutch IJKDIJK experiment conducted in 2009.

1. PRINCIPE ET INTERET DES TECHNOLOGIES DE SURVEILLANCE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES PAR MESURES REPARTIES PAR FIBRES OPTIQUES

1.1 Problématique générale

L'érosion interne est, avec l'érosion par surverse, la principale cause de rupture des digues et barrages en remblai. La surveillance des fuites est de ce fait une composante majeure du dispositif de sécurité de ces ouvrages. Les moyens conventionnels utilisés pour effectuer le suivi du comportement hydraulique sont d'une part l'inspection visuelle, d'autre part l'auscultation via les mesures de débit dans les ouvrages de drainage (canaux de drainage ou collecteurs de drains) – qui constituent des mesures directes des fuites – et via les mesures piézométriques – qui peuvent fournir une information indirecte sur celles-ci. Ces moyens de surveillance conventionnels sont toujours ponctuels dans l'espace et dans le temps. Ils se révèlent souvent inaptes à détecter des pathologies d'érosion interne avérées et ne sont généralement pas capables de fournir des informations suffisamment précises dans le temps et dans l'espace sur la localisation des fuites et leur cinétique d'évolution.

Depuis plusieurs décennies, la thermométrie s'est avérée comme l'une des mesures les plus pertinentes pour détecter la présence de fuites au sein d'ouvrages en terre. Reposant sur l'écart de température existant entre le massif non exposé à la fuite, où la température est régie par le phénomène de conduction de la chaleur imposée aux limites de l'ouvrage, et la zone de fuite, où la température est régie par le transport par convection de la chaleur de l'eau de fuite (cf. Figure 1), la thermométrie conventionnelle est utilisée couramment en phase de reconnaissances sur les ouvrages, par des mesures de profils verticaux de température réalisées dans des forages. Les capacités de la thermométrie ont été démultipliées par l'apparition de la technologie des fibres optiques, qui permet d'effectuer des mesures réparties de température. Cette avancée ouvre la voie à une utilisation des mesures de température dans le cadre de l'auscultation et de la génération d'alertes (détection des fuites et probablement à moyen terme, quantification des vitesses des écoulements de fuite).

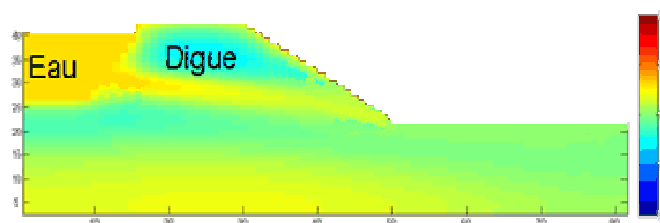


Figure 1 : Schéma d'une anomalie de température au sein d'une digue liée à une fuite

L'utilisation des mesures réparties de température et de déformation par fibre optique est également intéressante pour l'auscultation des barrages en béton, car elle permet d'améliorer le suivi de phases particulières de leur comportement, comme l'exothermie du béton et la décroissance de la température aux jeunes âges, ou pour conforter les modèles de comportement long terme (barrages poids et voûtes).

1.2 Principe général de la surveillance des ouvrages hydrauliques par mesures réparties par fibre optique

La mesure consiste à envoyer un rayon lumineux (rayon laser) dans une fibre optique standard installée à l'intérieur d'un ouvrage hydraulique en remblai. Le système de mesure est constitué de la fibre et d'un interrogateur opto-électronique. Le principe de mesure est basé sur la réflectométrie résolue dans le temps.

Un rayon laser émis par l'interrogateur envoie des impulsions de courte durée (quelques ns) dans la fibre optique où la silice réagit en absorbant et rétro-diffusant une partie de l'onde incidente. Le signal rétro-diffusé est analysé par l'interrogateur en y associant le temps d'aller-retour de l'onde lié à la distance de l'appareil. Le spectre de rétro-diffusion comprend plusieurs raies caractéristiques (cf. Fig. 2), dont :

- ✓ la raie Rayleigh correspondant aux fluctuations de densité et de composition de la silice. Elle est utilisée dans les réflectomètres télécom pour vérifier l'intégrité des liaisons optiques ;
- ✓ les raies Brillouin liées aux modes acousto-optiques, dépendant de la température et de la déformation de la fibre ;
- ✓ les raies Raman liées aux vibrations moléculaires de la silice. Le rapport d'intensité des deux raies Stokes et anti-Stokes est directement lié à la température de la fibre.

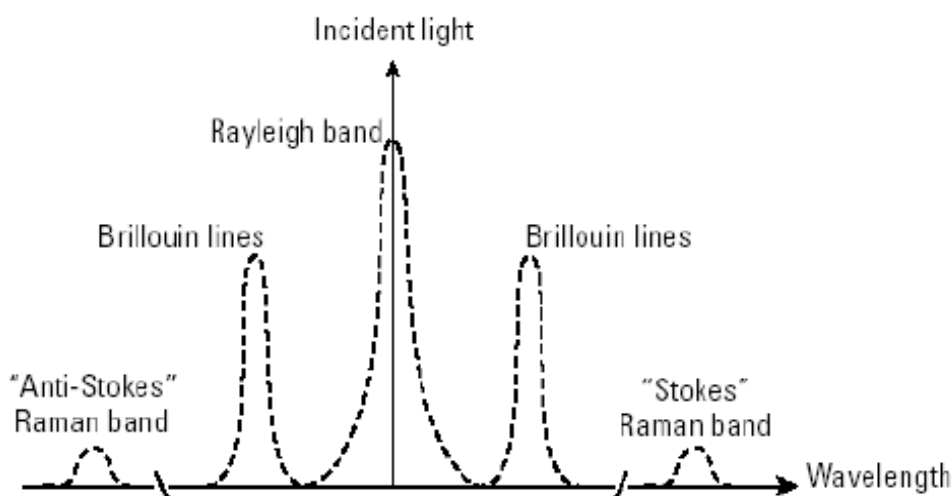


Figure 2 : Spectre de rétro-diffusion de la silice (d'après [1])

L'utilisation d'une fibre optique de type multi-modes permet d'utiliser l'effet Raman et de disposer d'une mesure répartie de la température tout le long de celle-ci. Les interrogateurs opto-électroniques disponibles sur le marché permettent d'obtenir une mesure de température tous les mètres pour une portée allant jusqu'à 10 km et tous les deux mètres au-delà de 10 km jusqu'à 30 km. La précision de cette mesure de température est de 0,1°C, mais celle-ci se dégrade pour les portées supérieures à 10 km (les valeurs de cette dégradation de la précision au-delà de 10 km ne sont pas encore bien connues faute d'un retour d'expérience suffisant). Le pas de temps d'acquisition des mesures peut varier d'une mesure toutes les 10 minutes à une mesure par an voire moins.

En disposant ainsi d'une mesure répartie de température au sein de l'ouvrage, positionnée judicieusement selon l'objectif à atteindre (ex. : contrôle d'une étanchéité en parement amont ou surveillance des fuites en pied de talus aval), la surveillance se base sur les principes de la thermométrie appliquée à la détection des fuites : là où la fibre optique intercepte une fuite, elle mesure une température régie par le transport de chaleur par convection le long de la fuite, ailleurs c'est la conduction qui contrôle la température.

Deux méthodes différentes peuvent être utilisées pour la surveillance des fuites par mesures réparties par fibre optique : la méthode passive et la méthode de chauffe, appelée également méthode active. Le principe de ces méthodes est exposé dans le paragraphe 1.4.

L'utilisation d'une fibre optique monomode permet d'utiliser l'effet Brillouin. En combinant au sein d'un même câble une fibre multimode permettant une mesure indépendante de la température par effet Raman et une fibre monomode, on peut déduire des mesures de la fibre monomode la déformation dans l'axe de celle-

ci, exprimée en micro-déformations ($\mu\epsilon$, ou $\mu\text{m/m}$). Le calcul de la déformation s'effectue à partir de la relation suivante :

$$\Delta\nu_{FO} = C_{\epsilon FO} \times \epsilon_{FO} + C_{TFO} \times \Delta T_{FO}$$

avec :

$\Delta\nu_{FO}$, le décalage fréquentiel des raies Brillouin, mesuré directement par l'interrogateur opto-électronique ;

$C_{\epsilon FO}$ et C_{TFO} , des paramètres de calage ;

ϵ_{FO} , la déformation de la fibre optique ;

ΔT_{FO} , la température de la fibre optique.

Les interrogateurs opto-électroniques basés sur les mesures Brillouin disponibles sur le marché permettent d'obtenir une mesure de déformation tous les mètres, avec une portée allant jusqu'à 30 km et une précision de l'ordre de 20 $\mu\epsilon$.

1.3 Principe de la surveillance des fuites par fibre optique par la méthode passive

La méthode dite passive consiste à analyser les mesures de températures acquises par la fibre optique. La détection d'anomalies de température à partir des mesures brutes de température de la fibre optique étant généralement impossible, le recours à des méthodes d'analyse, basées soit sur une approche physico-statistique, soit sur des approches de traitement du signal, est indispensable pour interpréter correctement ces données. La durée nécessaire pour effectuer le téléchargement des données puis leur analyse par un ingénieur varie, selon la taille de l'ouvrage, entre 2h et une journée. Aucun traitement des données complètement automatisé n'est actuellement envisagé.

Pour mener correctement ces interprétations, des mesures complémentaires de température de l'air, de l'eau à l'amont de l'ouvrage et de l'eau de la nappe sont généralement nécessaires.

Des essais effectués en laboratoire et sur sites expérimentaux ont permis de montrer que le rayon de détection d'une fuite autour de la fibre optique est de 1 à 2 m en employant cette méthode.

Les méthodes d'analyse basées sur l'approche physico-statistique nécessitent de disposer d'une chronique continue de données sur au moins 3 à 6 mois pour être en mesure de fournir un diagnostic sur la présence ou l'absence de fuite. Moyennant cette contrainte, ces méthodes peuvent être utilisées pour surveiller le comportement hydraulique à long terme comme pour générer des alertes en cas d'apparition soudaine d'un changement d'état.

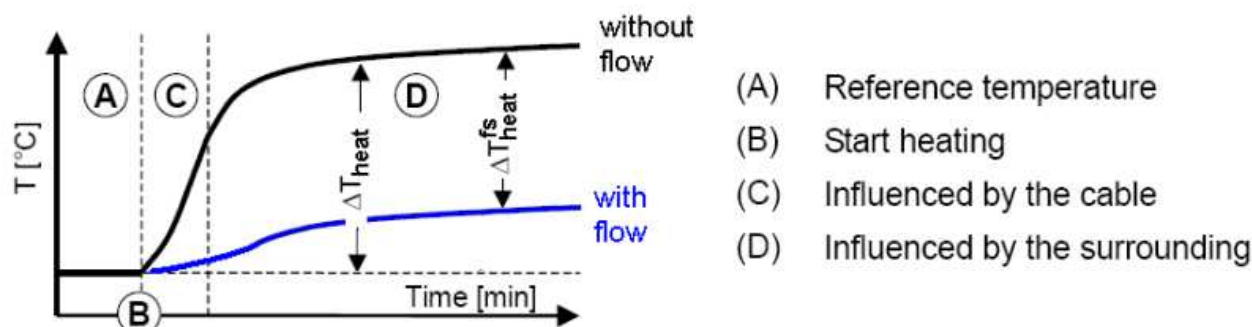
Certaines méthodes basées sur le traitement du signal ne nécessitent qu'une chronique continue de quelques jours de données pour être en mesure de fournir un diagnostic sur la présence ou l'absence de fuite. Ces méthodes peuvent ensuite être utilisées aussi bien pour la surveillance à long terme que pour la génération d'alertes (dans ce dernier cas, le délai entre la mesure et son interprétation est de l'ordre de 2 à 3 heures).

D'une manière générale, il est nécessaire de disposer d'une panoplie de méthodes complémentaires pour être en mesure de répondre correctement à l'ensemble des besoins de la surveillance, du suivi long terme du comportement de l'ouvrage à la génération d'alertes.

1.4 Principe de la surveillance des fuites par fibre optique par la méthode de chauffe (ou méthode active)

La méthode de mesure avec chauffe reprend les mêmes principes de base de la mesure distribuée de température par fibre optique, utilisant l'effet Raman présenté précédemment. La fibre optique est en plus entourée de câbles de cuivre chauffés par effet Joule sur une courte période de temps. La puissance électrique nécessaire à cette chauffe est de 3 à 15 W/m, d'après des études menées en laboratoire à petite échelle. La puissance électrique recommandée, d'après le retour d'expérience, pour utiliser cette méthode est cependant de 10 à 15 W/m, ce qui, pratiquement, rend très lourde et coûteuse la mise en œuvre de cette méthode sur des ouvrages de plus de 5 km de longueur, du fait de la nécessité de disposer d'équipements électriques de transformation et de pilotage de la puissance électrique. L'enregistrement de l'évolution de la température au cours de la période de chauffe permet de distinguer des comportements traduisant un

phénomène dominant de conduction (absence de fuite) ou un phénomène dominant de convection (présence de fuite). L'évolution de la température mesurée au cours de la mise en œuvre de cette méthode est représentée sur la Figure 3 ci-dessous.



Des essais effectués en laboratoire ont permis de montrer que le rayon de détection d'une fuite autour de la fibre optique est de 15 à 20 cm avec cette méthode.

La réalisation d'une mesure de chauffe et son interprétation durent environ 3 h. Cette méthode ne nécessite pas d'avoir acquis au préalable un historique de mesures. Elle est donc bien adaptée pour certaines problématiques de surveillance à courte échelle de temps (remise en eau d'ouvrage par exemple). Néanmoins, cette méthode nécessite pratiquement, en particulier pour des raisons de sécurité, la présence d'un intervenant sur site lors de la mesure, ce qui limite fortement son utilisation pour des situations de surveillance lors d'une mise en charge rapide et non prévisible de l'ouvrage.

La méthode de chauffe est ainsi bien adaptée aux canaux ou barrages en remblai d'assez faible longueur (≤ 5 km) en particulier pour la surveillance lors des remises en eau, ou à tout autre type de surveillance caractérisé par une courte échelle de temps (quelques heures à quelques jours) et lorsque la présence sur site d'un intervenant spécialisé dans le fonctionnement des équipements électriques de puissance est possible.

1.5 Remarques sur l'interprétation des mesures de déformation par fibre optique

La technologie de surveillance des déformations par mesures réparties par fibre optique n'est encore qu'au stade de la recherche et développement et n'a pas encore fait l'objet d'une qualification sur des ouvrages réels. Plusieurs questions relatives à la mise en œuvre de cette technologie restent à résoudre :

- ✓ le passage de la déformation mesurée par la fibre optique à la déformation du câble qui entoure la fibre,
- ✓ puis le passage de la déformation du câble à la déformation du sol qui l'entoure,
- ✓ et enfin le passage de la déformation du sol à un vecteur de déplacement de ce sol. C'est généralement ce vecteur déplacement qui est recherché pour analyser l'évolution du comportement mécanique d'un ouvrage et qui peut être comparé à des mesures conventionnelles d'auscultation.

2. DEMARCHE D'EDF-PRODUCTION ET INGENIERIE HYDRAULIQUE POUR INTEGRER LA TECHNOLOGIE DE FIBRE OPTIQUE AU PARC DES MATERIELS D'AUSCULTATION DES BARRAGES ET DIGUES DE CANAUX

EDF mène un effort continu de R&D depuis 11 ans pour utiliser les mesures réparties de température par fibre optique pour surveiller les fuites dans les ouvrages hydrauliques en remblai.

Durant cette phase de Recherche et Développement, des expérimentations de surveillance des fuites par fibre optique ont été réalisées selon le schéma de développement classique de toute nouvelle technologie :

- ✓ les expérimentations de laboratoire ;
- ✓ les expérimentations sur site contrôlé ;
- ✓ les expérimentations sur sites réels.

Ces expérimentations ont permis de valider une panoplie de modèles complémentaires d'analyse des mesures de température brute des fibres optiques développés par EDF dans le cadre de cet effort de recherche et de préciser leur domaine de validité. Elles ont également permis de montrer la capacité de ces modèles à détecter des fuites minimales comprises entre 0,1 l/min et 1 l/min, selon le type d'ouvrage. Elles ont aussi montré que cette technologie peut être utilisée à la fois pour effectuer une surveillance long terme du comportement hydraulique et comme un moyen d'alerte précoce en cas d'apparition d'une anomalie importante au sein de l'ouvrage, liée à une fuite.

Alors que l'effort de recherche d'EDF se poursuit sur la quantification des fuites et l'interprétation des mesures de déformation, les résultats obtenus sur la localisation des fuites ont été jugés suffisamment aboutis pour engager une démarche par étape pouvant à terme conduire à un déploiement industriel de cette technologie sur une partie des ouvrages en remblai du parc d'EDF.

Après la phase de R&D composée des trois étapes décrites précédemment, le déploiement de la surveillance des fuites par fibre optique suit désormais le processus suivant :

- ✓ phase expérimentale : implémentée sur quelques sites réels, l'installation est à l'échelle de l'ouvrage. L'objectif est de maîtriser la réalisation de l'installation (qualité, coûts, délais), de valider les méthodes d'interprétation des données brutes, de tester l'organisation humaine en charge de l'exploitation de cette surveillance, d'assurer la compatibilité et l'insertion des données de cette surveillance dans le Système d'Information des données d'auscultation d'EDF et d'effectuer un REX financier.
- ✓ Phase pré-industrielle : la technologie est déployée sur différents sites réels, les procédures de réalisation d'installation sont définies, les méthodes d'interprétation des données brutes sont fixées et durcies, l'organisation humaine pour l'exploitation et la maintenance du système est mise en place, l'intégration des données issues de cette surveillance par fibre optique dans le Système d'Information des données d'auscultation d'EDF est validée et le REX financier est précisé.
- ✓ Phase industrielle : la technologie est déployée en fonction des nécessités. .

La validation d'une phase et le passage à la phase suivante relève d'un comité spécifique chargé du suivi de ce déploiement.

3. RETOUR D'EXPERIENCE D'EDF SUR SES INSTALLATIONS DE SURVEILLANCE DES FUTES ET DES DEFORMATIONS PAR FIBRE OPTIQUE

3.1 Installations de surveillance par fibre optique réalisées jusqu'à présent par EDF

Les installations de surveillance des fuites par fibre optique réalisées à ce jour par EDF dans le cadre de son programme de Recherche et Développement sont les suivantes :

- ✓ expérimentations sur sites contrôlés :
 - bassin PEERINE d'IRSTEA à Aix-en-Provence (maître d'ouvrage : IRSTEA et réalisation conjointe de l'installation par IRSTEA et EDF) ;
 - essais néerlandais IJKDIJK d'érosion interne (maître d'ouvrage : TNO et réalisation conjointe de l'installation par TENCATE, EDF et geophyConsult) ;
- ✓ expérimentations sur sites réels :
 - digue du canal d'Oraison (maître d'ouvrage : EDF). Installation de 2,3 km de fibre optique dans une tranchée de 1 m de profondeur en pied du talus aval ;
 - digue du Grand Canal d'Alsace à Kembs (maître d'ouvrage : EDF). Installation sur un linéaire de 1 km d'une fibre optique dans une tranchée de 1 m de profondeur sous la risberme aval et d'une autre fibre optique en pied du talus du canal de drainage ;
 - levée de la Loire au Val d'Authion (maître d'ouvrage : DREAL Centre et réalisation conjointe de l'installation par TENCATE, EDF et geophyConsult). Installation sur 1 km

- de longueur du produit Geodetect® de Tencate (géotextile équipé de plusieurs fibres optiques de mesure de la température et de la déformation) sur le talus aval de la levée ;
- digue du canal de la Marne au Rhin à Contrisson (maître d'ouvrage : VNF et réalisation conjointe de l'installation par TENCATE, EDF et geophyConsult). Installation sur 1 km de longueur du produit Geodetect® de Tencate sur le talus aval.

Les installations de surveillance des déformations par fibre optique réalisées à ce jour par EDF dans le cadre de son programme de Recherche et Développement sont les suivantes :

- ✓ expérimentation sur site contrôlé :
 - laboratoire du CETE de Rouen (maître d'ouvrage : CETE de Rouen) ;
- ✓ expérimentation sur site réel :
 - canal de Curbans (maître d'ouvrage : EDF).

EDF a réalisé à ce jour une première installation de surveillance des fuites par fibre optique entrant dans son programme de déploiement de cette technologie :

- ✓ site en phase expérimentale : canal de Curbans (maître d'ouvrage : EDF).

Dans le domaine des barrages en béton, EDF a équipé le barrage en BCR de Rizzanese, en Corse, au cours de sa construction, de fibres optiques de mesures de la température et de mesure de la déformation, afin de surveiller le comportement du béton au jeune âge (exothermie du béton et surveillance au cours des premières années après la mise en eau).

3.2 Retour d'expérience d'EDF dans le domaine de la conception des installations de surveillance par fibre optique

Les principaux points du retour d'expérience d'EDF relatif à la conception des installations de surveillance par fibre optique des ouvrages hydrauliques en remblai sont les suivants :

- ✓ comme pour toute installation de surveillance d'un ouvrage hydraulique, il est impératif que la conception d'une installation de surveillance par fibre optique utilise comme données d'entrée les résultats d'une étude de diagnostic de sûreté de l'ouvrage. Cette étude de diagnostic doit en particulier établir le niveau de performance de chaque barrière de sécurité de l'ouvrage et préciser le cheminement des fuites (avérées ou potentielles) à travers l'ouvrage, de manière à pouvoir ensuite positionner les fibres optiques là où elles auront le plus de chance d'intercepter ces fuites.
- ✓ La conception d'une installation de surveillance doit englober l'installation de fibres optiques et l'installation d'équipements d'auscultation conventionnels complémentaires, dont la nature et le positionnement doivent être définis en fonction des pathologies avérées ou potentielles à surveiller.
- ✓ Il est indispensable, au cours de la phase de conception de l'installation de fibres optiques, de valider la capacité des modèles d'analyse des données brutes de température à détecter les anomalies de température attendues dans l'ouvrage. Pour cela, le concepteur doit être en mesure de réaliser une modélisation thermo-hydraulique de l'ouvrage, typiquement à l'aide de modèles aux éléments finis 2D verticaux représentant des sections transversales représentatives des différents segments homogènes de l'ouvrage, qui permettent d'obtenir des données synthétiques de température avec la prise en compte d'anomalies de type fuite. Ces données synthétiques de température sont ensuite utilisées comme données d'entrée des modèles d'analyse des données brutes de température et l'on vérifie que ces derniers modèles sont bien capables de détecter les fuites simulées. Cette approche de modélisation permet également d'optimiser le positionnement de la fibre au sein de l'ouvrage, en déterminant la position de la fibre qui permet d'obtenir la meilleure détection de fuites. La mise en œuvre de cette modélisation nécessite dans la plupart des cas, l'acquisition, par des mesures in situ, de données de température acquises durant plusieurs mois, qui seront utilisées pour les conditions aux limites des modèles : température de l'eau retenue à l'amont de l'ouvrage, température de la nappe phréatique et température de l'air et autres éventuelles conditions thermiques aux limites du modèle.

- ✓ Le choix des matériels utilisés dans l'installation de fibres optiques constitue également une étape clé pour la réussite de l'installation. Ce choix doit reposer sur une très bonne connaissance des matériels disponibles sur le marché par le maître d'œuvre chargé de la conception, tant pour les fibres optiques que pour les interrogateurs opto-électroniques. Un mauvais choix de fibre optique (par exemple un câble dont la résistance est mal adaptée aux conditions d'installation sur le chantier) peut être rédhibitoire pour la pérennité de l'installation. Un mauvais choix d'interrogateur opto-électronique (par exemple un appareil qui n'est pas fiable) peut entraîner une forte indisponibilité du système de surveillance. EDF consacre depuis 10 ans des moyens substantiels à l'évaluation de ces matériels, afin d'être en mesure de sélectionner pour chaque projet le matériel le plus adapté. En particulier, le LNE (Laboratoire National d'Essais) a développé, en collaboration avec EDF, un banc d'étalonnage des interrogateurs opto-électroniques de mesures Raman, qui permet à EDF d'effectuer un suivi métrologique rigoureux de ces appareils.

3.3 Retour d'expérience d'EDF dans le domaine de la réalisation des installations de surveillance par fibre optique

Les principaux points du retour d'expérience d'EDF relatif à la réalisation des installations de surveillance par fibre optique sur les ouvrages en remblai sont les suivants :

- ✓ il est indispensable que le maître d'œuvre effectue des contrôles continus au cours de la réalisation de l'installation de surveillance par fibre optique. Ces contrôles concernent notamment l'intégrité des fibres optiques et s'achèvent par la réception finale de l'installation.
- ✓ Si la réalisation de l'installation de surveillance par fibre optique est concomitante avec des travaux de confortement de l'ouvrage, il est indispensable que le maître d'œuvre assure en amont mais surtout au cours du chantier, une coordination la plus étroite possible entre les deux activités.
- ✓ Le coût constaté de la fibre optique installée sur le canal de Curbans (hors génie civil) est d'environ 35 k€/km pour 11 km de fibre optique de mesure de température et 2 km de fibre optique de mesure de déformation.

3.4 Retour d'expérience d'EDF dans le domaine de l'exploitation et de la maintenance des installations de surveillance par fibre optique

Les principaux points du retour d'expérience d'EDF relatif à l'exploitation et à la maintenance des installations de surveillance par fibre optique sont les suivants :

- ✓ l'utilisation de logiciels d'analyse des données brutes de température est indispensable pour détecter des fuites. La simple visualisation des données brutes de température ne permet généralement pas d'atteindre l'objectif de détection. L'utilisation d'une seule méthode (basée sur une approche physico-statistique ou sur une approche d'analyse journalière) n'est généralement pas suffisante. Le maître d'ouvrage ou son prestataire chargé de l'exploitation et de l'interprétation des données d'auscultation doit disposer d'une panoplie de logiciels basés sur des approches différentes et complémentaires, afin d'être en mesure de détecter des anomalies dans les différentes configurations de pathologies et de chargements que peut subir l'ouvrage.
- ✓ Comme pour toute installation d'auscultation d'ouvrages hydrauliques, la pérennité (pendant la vie de l'ouvrage, soit en ordre de grandeur la centaine d'année) du dispositif doit être assurée ; elle concerne la maintenance et l'exploitation de l'installation, mais aussi l'interprétation et l'archivage des données.
- ✓ L'équipe chargée de la maintenance et de l'exploitation du système de surveillance par fibre optique doit disposer de compétences pluridisciplinaires dans les domaines suivants :
 - sûreté des ouvrages hydrauliques (diagnostic de sûreté, modélisation, inspections visuelles) ;
 - modèles d'analyse des données brutes de température mesurées par les fibres optiques ;
 - fibres optiques et matériels opto-électroniques ;
 - maintenance et interprétation des moyens d'auscultation conventionnels (piézomètres, limnigraphes, mesures de débits, mesures topographiques) ;
 - maintenance des installations de télémesure ;
 - archivage long terme des données d'auscultation.

4. VALIDATION DE LA TECHNOLOGIE EDF DE SURVEILLANCE DES FUITES PAR FIBRE OPTIQUE LORS DES ESSAIS NEERLANDAIS IJKDIJK D'ÉROSION INTERNE

Afin d'améliorer la sûreté de ses digues de protection contre les inondations, le gouvernement néerlandais a lancé le projet Ijkdijk dont l'objet est d'évaluer différentes technologies d'auscultation lors d'essais de rupture de digue à grande échelle sous différents types de sollicitation. En 2009, quatre essais de rupture par érosion interne ont été conduits, auxquels EDF et geophyConsult ont participé en collaboration avec TENCATE.

Lors de chacun de ces quatre essais, une digue expérimentale à l'échelle 1 a été construite, puis a été soumise sur sa face amont à un chargement hydraulique devant théoriquement l'amener à une rupture par érosion interne. Plusieurs sociétés, dont le groupement TENCATE, EDF et geophyConsult ont installé, préalablement à ce chargement, leur système d'auscultation et ont communiqué à la direction du projet les résultats de leurs mesures tout au long de chaque essai, jusqu'à la rupture de la digue. Le remblai expérimental présentait une longueur de 15 m, une hauteur de 3,5 m et des pentes amont et aval de 2. Il était constitué d'argile et reposait sur une fondation en sable saturée préalablement à la mise en eau. Les fibres optiques ont été installées au sein du remblai lors de sa construction, dans la fondation sableuse, à proximité de l'interface avec l'argile de la digue (cf. Figure 4 ci-dessous).

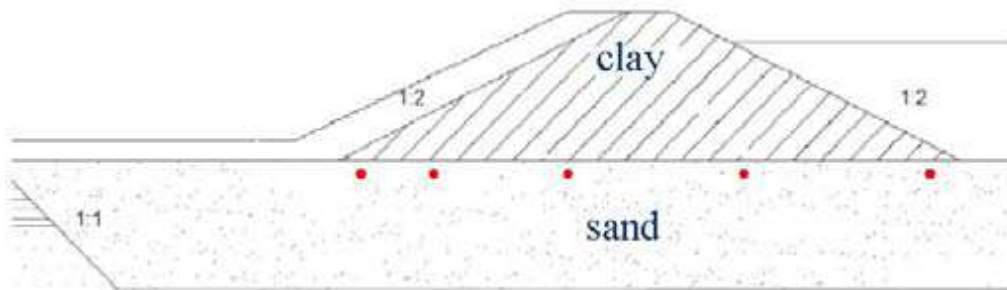


Figure 4 : Coupe transversale de la digue expérimentale avec la position des fibres optiques (points rouges)

Chaque essai a duré de 4 à 6 jours. Pour ce type d'application, une méthode d'analyse journalière a été utilisée pour traiter les données brutes de température mesurées par les fibres optiques. Les résultats de cette analyse ont ensuite été comparés aux données issues des observations visuelles effectuées le long du pied du talus aval de la digue, de manière continue tout au long des essais. Dans cet article ne sont présentés à titre d'exemple que les résultats du second des quatre essais réalisés.

Lors du second essai d'érosion interne, le remplissage du réservoir s'est achevé le 19/10/2009 à 12h00 et l'essai s'est achevé le 25/10/2009 à 10h00 suite à l'apparition des signes précurseurs d'une formation d'une brèche dans le remblai. La charge hydraulique maximale imposée sur le talus amont de l'ouvrage a été de 1,9 m.



Figure 5 : début de la construction de la digue de l'essai n°2 (photo Deltares)



Figure 6 : Fin de l'essai n°2 avec le début de la formation d'une brèche (photo Deltares)

Les données prises en compte pour l'analyse ont été acquises du 19/10 à 9h18 au 25/10 à 9h29. La visualisation des données brutes a permis de détecter les précurseurs de la zone de rupture deux jours avant que celle-ci ne se produise (cf. Figures 7 et 8 ci-dessous).

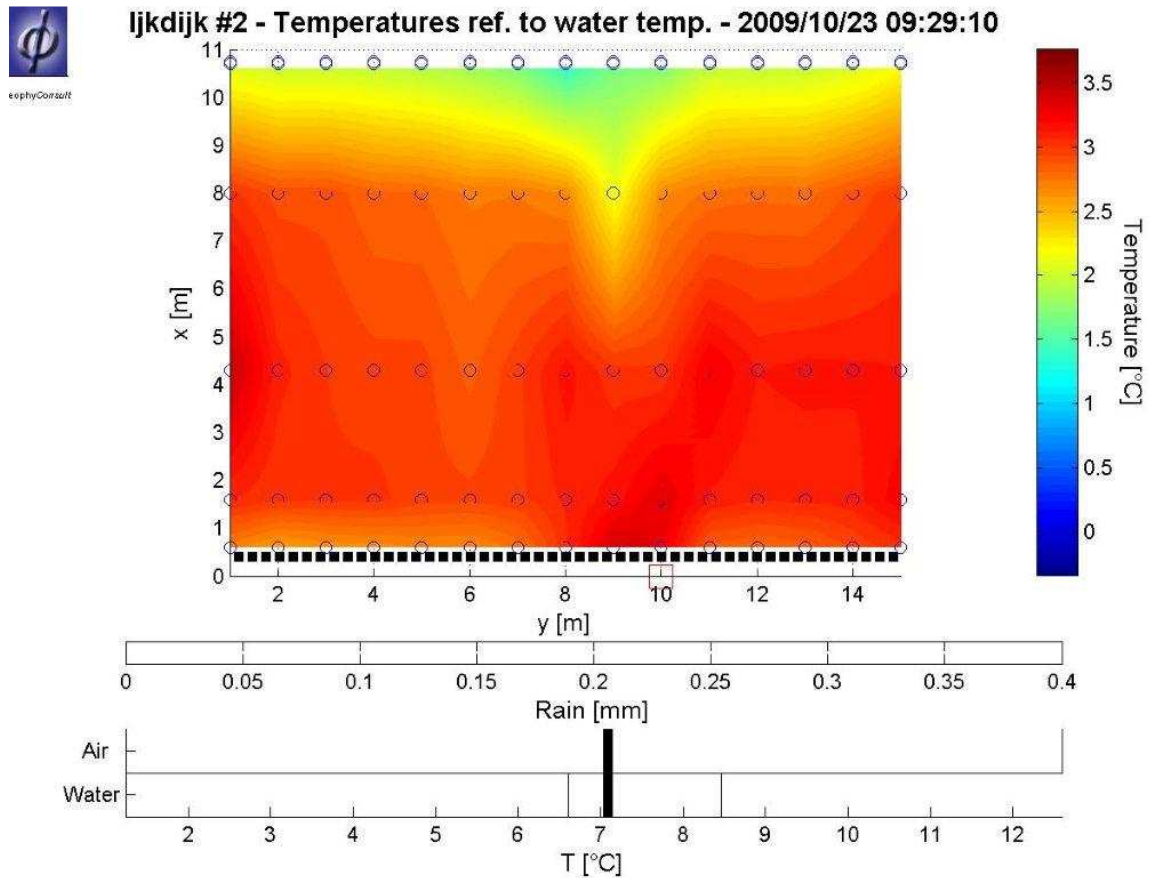


Figure 7 : Visualisation des données brutes de température mesurées par les fibres optiques deux jours avant la fin de l'essai n°2. En abscisse : axe longitudinal de la digue. En ordonnées : axe transversal de la digue.

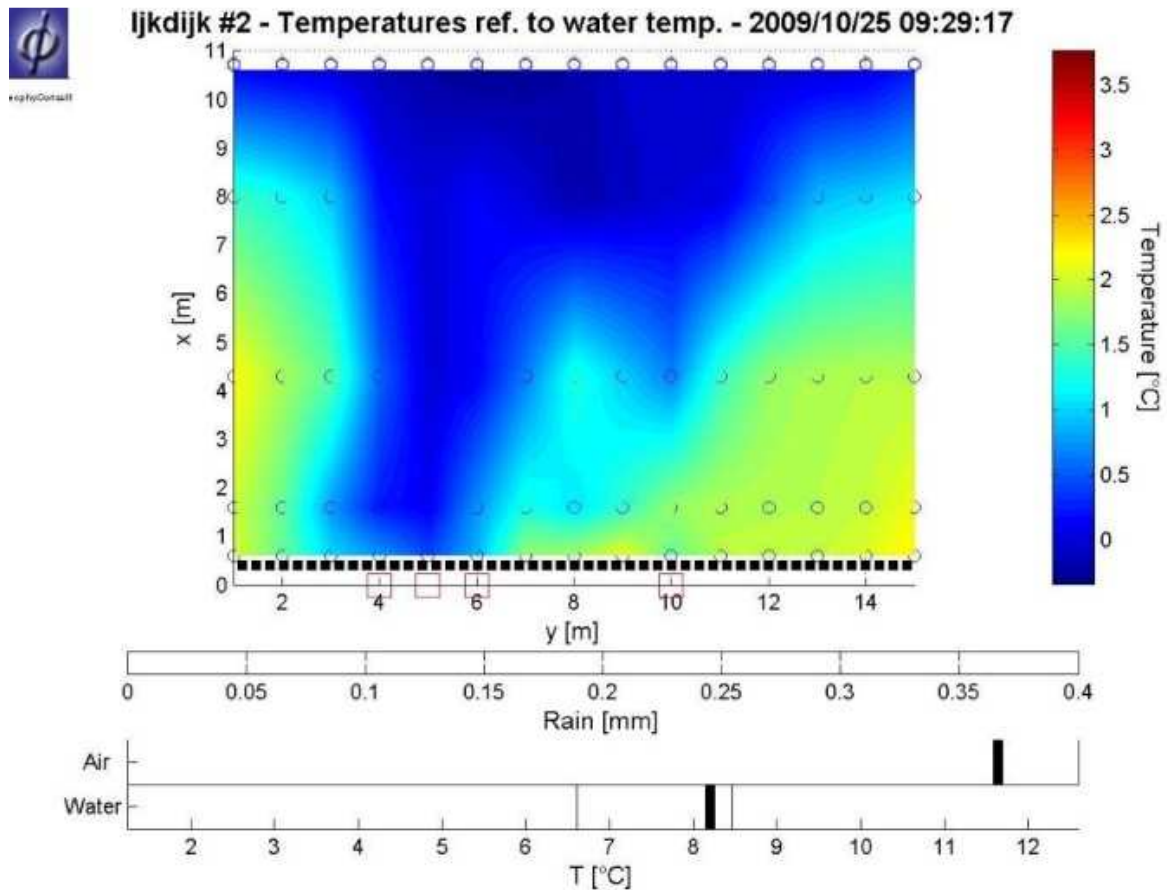


Figure 8 : Visualisation des données brutes de température mesurées par les fibres optiques 1/2 heure avant la fin de l'essai n°2. En abscisse : axe longitudinal de la digue. En ordonnées : axe transversal de la digue.

L'application de la méthode d'analyse journalière a montré qu'au cours de la première journée, aucune anomalie significative n'a pu être mise en évidence (cf. Figure 9 ci-dessous). Au contraire, à partir de la seconde journée (20/10) et jusqu'au 23/10, les résultats présentés dans la Figure 9 révèlent la présence d'une forte anomalie à l'abscisse 9 m environ (abscisse longitudinale le long du pied du talus aval de la digue), correspondant à une zone de fuite identifiée par les inspections visuelles à la même période. D'autres anomalies de moindre amplitude peuvent également être identifiées sur ces résultats, notamment autour de l'abscisse 14 m.

Du fait de la forte augmentation de l'indicateur de détection lors des deux dernières journées de données analysées, les résultats sont présentés avec une échelle différente sur la Figure 10. De fortes dissimilarités (indiquant des anomalies de type fuite) apparaissent à nouveau les 23 et 24/10.

Finalement, lors de la dernière journée de données analysées, celle du 24-25/10, les zones d'anomalies s'étendent sur une grande partie du linéaire de l'ouvrage et mettent en évidence plusieurs zones de forte intensité du paramètre de détection. Cette augmentation de l'intensité du paramètre de détection peut être attribuée à l'augmentation du débit de fuite.

Cette méthodologie d'analyse des données brutes de température a permis une détection des zones de fuite dès le deuxième jour de l'essai, soit entre quatre et cinq jours avant la rupture de la digue, pour une durée totale d'essai de six jours.

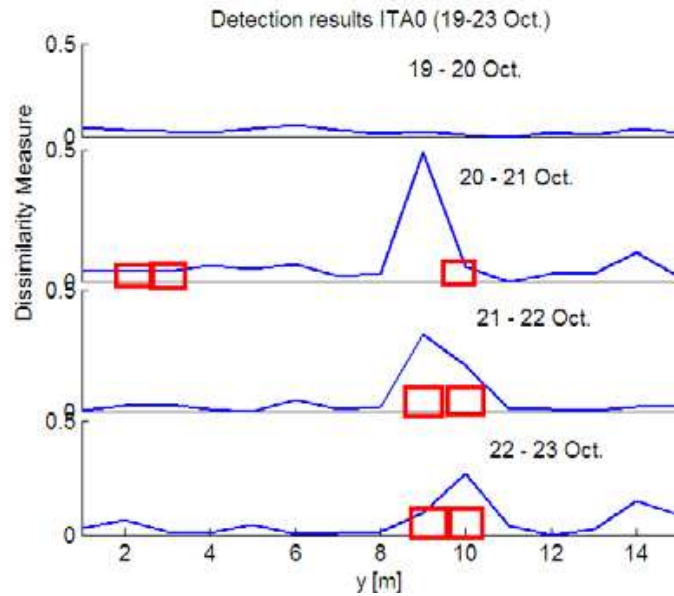


Figure 9 : Résultats d'analyse pour le test n°2 (19-23/10/2009) pour les fibres optiques situées à l'aval. Les rectangles rouges représentent les fuites observées lors des inspections visuelles

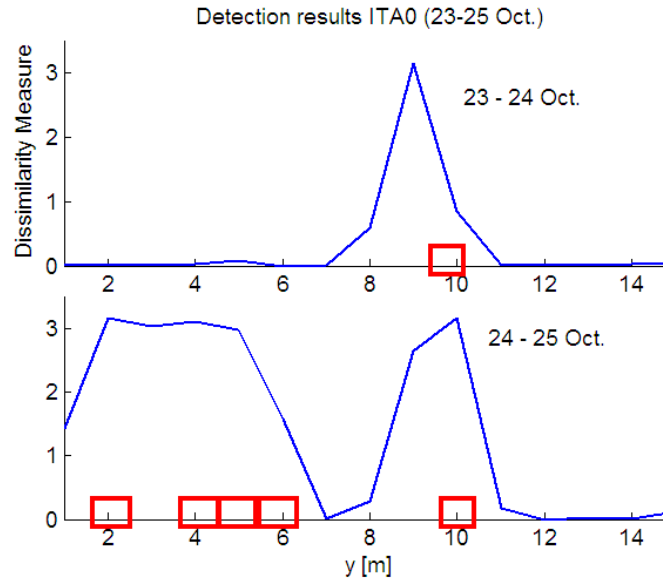


Figure 10 : Résultats d'analyse pour le test n°2 (23-25/10/2009) pour les fibres optiques situées à l'aval. Les rectangles rouges représentent les fuites observées lors des inspections visuelles

Les résultats présentés précédemment sont basés sur l'analyse des variations de température journalière à toutes les abscisses. En conséquence, le paramètre de détection présente une résolution temporelle de 24 h et une résolution spatiale de 1 m. Il est possible d'améliorer la résolution temporelle à partir d'une analyse infra-journalière (12 h) sans augmentation significative du temps de calcul (cf. Figure 11). L'apparition et la disparition des différentes fuites peuvent être mises en évidence à partir d'une analyse sur 12 h. Si l'on considère par exemple la dernière journée d'analyse (24-25/10), les fuites aux abscisses 2 m, 4 m, 5 m, 6 m et 10 m sont bien représentées, avec la diminution du paramètre de détection à l'abscisse 10 m et l'apparition d'une fuite à l'abscisse 2 m au cours des 12 dernières heures. Le débit de fuite le plus important se situe au niveau des abscisses 4 à 6 m durant les dernières 12 heures, ce qui est conforme aux observations.

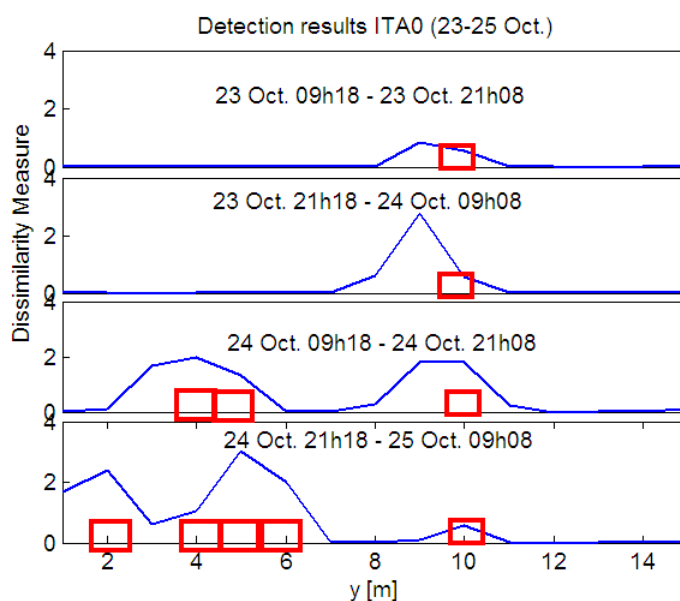


Figure 11 : Analyse avec une résolution temporelle de 12 h de l'essai 2, pour la fibre optique située à l'aval, du 23 au 25 octobre. Les rectangles rouges représentent les fuites observées lors des inspections visuelles.

La méthode d'analyse journalière a ainsi permis de mettre en œuvre aisément différentes variantes, choisies en fonction des caractéristiques du site instrumenté et des objectifs recherchés, comme l'analyse sur 12 heures avec des fenêtres glissantes et un recouvrement sur quelques heures. Ce type d'outil d'analyse s'est révélé déterminant pour l'émission d'alertes précoces de suspicions de fuites.

Les mesures de fuite par fibre optique du consortium TENCATE-EDF-geophyConsult se sont révélées en parfait accord avec les mesures de référence installées dans la digue (pressions interstitielles) et ont été jugées parmi les plus performantes et les plus fiables de la panoplie de systèmes d'auscultation testés à Ijkdijk.

CONCLUSION

Les fibres optiques font l'objet, depuis une dizaine d'années, d'importants travaux de recherche et développement dans leur application à la surveillance des ouvrages hydrauliques. Cette technologie est désormais arrivée à maturité pour la détection des fuites dans les ouvrages hydrauliques en remblai, ce qui constitue une avancée importante pour la détection de l'érosion interne, qui demeure l'un des modes de rupture principaux de ces ouvrages. L'utilisation des mesures de température dans les barrages en béton est également une technologie prête à être utilisée, notamment pour les projets d'ouvrages neufs, pour suivre le comportement thermique du béton en cours de construction et durant les premières années après la mise en eau du barrage. En revanche, les mesures réparties de déformation par fibre optique sont encore au stade de la recherche et développement mais permettent dès à présent d'envisager un suivi du comportement mécanique des ouvrages en remblai comme des ouvrages en béton avec cette technologie.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tous les acteurs d'EDF et de *geophyConsult* ayant travaillé sur le projet de développement de la surveillance des ouvrages hydrauliques par fibre optique pour leur contribution dans l'élaboration de cette communication collective.

Ils remercient également l'équipe de TENCATE avec laquelle ils ont collaboré lors des essais néerlandais Ijkdijk d'érosion interne de 2009.

REFERENCES

- [1] J.-M. Hénault, S. Blairon. 2006. Exemple d'application de capteurs à fibre optique. Détection de fuites dans les digues en terre par thermométrie à fibre optique. CMOI.
- [2] S. PERZLMAIER, M. AUFLEGER, M. CONRAD. 2004. Distributed Fiber Optic Temperature Measurements in Hydraulic Engineering. Prospects of the Heat-up Method. ICOLD annual meeting, Seoul.