

# AUSCULTATION D'OUVRAGES EN TERRE AVEC UN SYSTÈME DE DÉTECTION ET D'ALERTE PAR FIBRES OPTIQUES

## **EARTHWORKS AND HYDRAULIC WORKS SURVEILLANCE WITH A MONITORING AND EARLY WARNING FIBER OPTICS SYSTEM**

Olivier ARTIERES<sup>1</sup>, Laurent BRIANÇON<sup>2</sup>, Alain ROBINET<sup>3</sup>

<sup>1</sup> TenCate Geosynthetics, Bezons, France

<sup>2</sup> Conservatoire national des arts et métiers, Paris, France

<sup>3</sup> SNCF, Paris, France

**RÉSUMÉ** – La solution d'auscultation s'articule autour de capteurs composites géotextile et fibres optiques pour la mesure de la température et de la déformation dans les ouvrages en terres et hydrauliques. Elle est très sensible, avec des seuils de détection de 0,02 % et 0,1°C, tant sur des ouvrages ponctuels que sur de longues infrastructures linéaires. Elle équipe de nombreux murs, remblais sur pieux ou avec risque de cavités, bassins, ISD et digues depuis plus de 6 ans.

**Mots-clés** : Auscultation, Alerte, Capteur, Géosynthétiques, fibre optique.

**ABSTRACT** – The monitoring solution is based on geotextile and fibre optics composite sensors, to measure both strain and temperature. It is very accurate as the detection thresholds are respectively lower than 0.02 % and 0.1°C, either on localized works or on long linear infrastructures of several tens of kilometres. It is now used for more than 6 years on several walls, embankments on piles or over potential cavities, basins, landfills and dykes.

**Keywords**: Monitoring, Warning, Sensor, Geosynthetics, Fiber optic.

### 1. Introduction

La mesure des déformations dans les ouvrages en terre par l'intermédiaire de capteurs isolés est lourde à mettre en place et pose parfois des problèmes de fiabilité sur le long terme.

Une nouvelle solution a été développée au début des années 2000 pour pallier ces insuffisances. Elle s'articule autour de capteurs composites textile et fibres optiques, associés à différentes technologies de mesure sur fibres optiques de paramètres comme la température ou la déformation.

Les principaux atouts de cette solution sont sa grande sensibilité de mesure, respectivement de 0,1 °C pour la température et de 0,01 % pour la déformation, sa résolution spatiale de l'ordre du mètre, la durabilité des capteurs dans les sols, son aptitude à pouvoir ausculter avec la mêmes performance tant des ouvrages ponctuels, comme des murs ou des talus, que des infrastructures linéaires de plusieurs dizaines de kilomètres de long : routes, voies ferrées, digues, pipelines.

Les premières installations remontent à 2004 d'une part comme solution d'auscultation périodique d'une pile de pont renforcé par géotextiles sur la déviation de Saint-Saturnin (72), et d'autre part comme solution d'alerte sur un tronçon de voie ferrée traversant une zone présentant des risques potentiels de cavités en sous-sol à Arbois (39). Nous reviendrons sur le comportement à long terme de la solution d'auscultation en place depuis plus de six ans.

Cette solution d'auscultation a été par ailleurs été utilisée sur des ouvrages hydrauliques, comme des bassins ou des digues, permettant la détection et la localisation de signes précurseurs de dysfonctionnement, tels que des fuites ou des instabilités. Nous présenterons enfin une application dans la réhabilitation d'une installation de stockage de déchets (ISD) permettant le suivi des déformations d'une géomembrane de couverture.

## 2. La solution d'auscultation et de détection précoce TenCate GeoDetect®

Cette solution est issue des deux projets de développement européens Euréka Σ!2579 et Σ!3361. Elle associe une structure géotextile, des câbles optiques (Figure 1), une instrumentation et ses logiciels pour offrir une solution très innovante répondant aux besoins multifonctionnels des applications géotechniques.

### 2.1. Le capteur

La partie géotextile apporte d'une part ses fonctions hydrauliques et mécaniques, notamment le frottement, et également les fonctions classiques des géotextiles, comme par exemple la capacité de drainage dans le plan, le renforcement du sol ou sa filtration. Le géotextile offre d'autre part un bon niveau de protection des fibres optiques et la capacité à porter plusieurs lignes optiques.

Les fibres optiques permettent la mesure de deux paramètres principaux pour le suivi des ouvrages en terre et des ouvrages hydrauliques que sont la déformation du sol et la température.

La mesure de la déformation du sol est possible, comme nous le verrons plus loin, grâce aux excellentes propriétés de frottement entre la structure géotextile à composante non-tissée aiguilletée et le sol, d'une part, et, d'autre part, par la liaison de la fibre optique sur le textile. Ainsi, les déformations du sol sont immédiatement transférées aux capteurs optiques.

La mesure de la température est utile pour connaître l'état de l'ouvrage, notamment lors de problématiques de gel-dégel. Elle est également utilisée indirectement pour détecter et localiser des fuites, dans des corps de digue ou des barrages par exemple. Enfin elle permet, dans certains cas, de compenser les mesures de déformations dues aux fluctuations thermiques.

Pour assurer l'étanchéité du dispositif de mesures, les fibres optiques sont protégées par une gaine. Grâce à ce gainage et aux propriétés intrinsèques des lignes optiques, le système est insensible à la corrosion, à la foudre et aux radiations. Il ne peut pas entraîner d'interférences électromagnétiques, ni provoquer d'explosions (pas de risque d'étincelle).

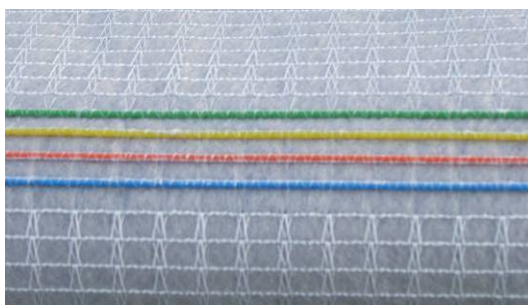


Figure 1. Le capteur composite textile et les câbles optiques (en couleur).

### 2.2. L'instrumentation optique

Les réseaux de Bragg et la mesure distribuée Raman ou Brillouin sont des technologies de mesure par fibre optique éprouvées pouvant être intégrées dans cette solution d'auscultation par fibres optiques.

#### 2.2.1. Les réseaux de Bragg

Un réseau de Bragg (« Fibre Bragg Grating » ou « FBG ») est une singularité locale, insérée en un point donné et choisi de la fibre optique. Il est constitué par une série de bandes rapprochées inscrites dans le cœur de cette fibre optique (que l'on peut se représenter comme des miroirs), dont l'indice de réfraction est connu. Chaque réseau va réfléchir une longueur d'onde prédéterminée du faisceau lumineux tout en se laissant traverser par les autres longueurs d'onde.

L'instrumentation envoie ainsi un large spectre de lumière dans la fibre ; chaque réseau est identifié par la raie très étroite de ce spectre qu'il réfléchit ; cette raie correspond à la longueur d'onde  $\lambda$  très précise du réseau de Bragg (Figure 2a). La longueur d'onde réfléchie est sensible aux variations de température et de déformation auxquelles est soumise la fibre optique. Ainsi il est possible de mesurer les variations de déformation et de température du milieu environnant la fibre optique (Figure 2b).

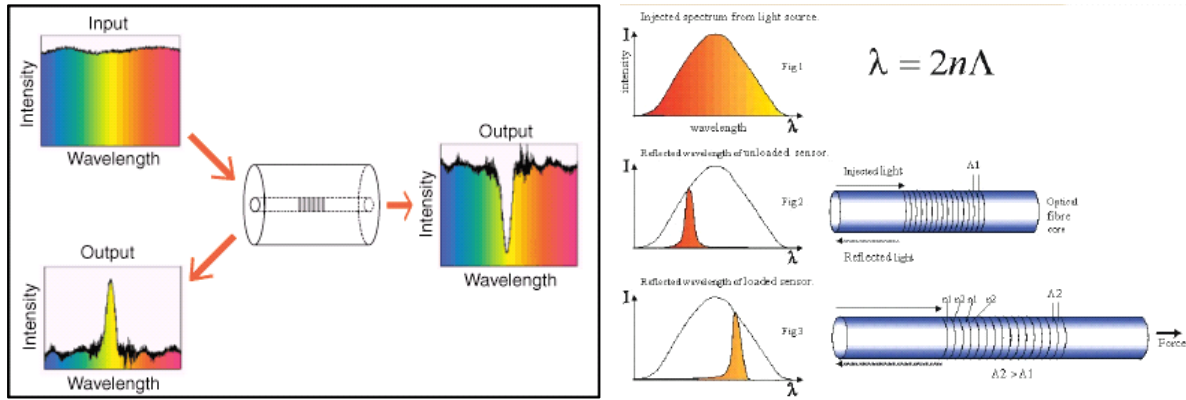


Figure 2. Principe du capteur à réseaux de Bragg. (2a) : réflexion d'une longueur d'onde donnée (2a) en laissant passer le reste du spectre incident. (2b) : la longueur d'onde réfléchie est décalée selon la déformation du réseau de Bragg.

### 2.2.2. La mesure distribuée

A l'inverse des réseaux de Bragg, la mesure distribuée scrute les variations de température et de déformation en tout point d'une fibre optique standard sur plusieurs dizaines de kilomètres. Un laser envoie dans la fibre une lumière cohérente de longueur d'onde donnée  $\lambda_0$ . En tout point de la fibre, les hétérogénéités et les vibrations moléculaires de la silice vont rétrodiffuser une faible partie de cette lumière selon le spectre indiqué sur la figure 3. Une partie de la lumière est retournée avec la même longueur d'onde  $\lambda_0$  que la lumière incidente (pic Rayleigh). Des pics secondaires de lumière se créent également de part et d'autre de la longueur d'onde incidente  $\lambda_0$ . Les variations de température et de déformation en tout point vont modifier la forme de ces pics. Les pics Brillouin se décalent en longueur d'onde lorsque la température et la déformation varient. L'amplitude du pic Raman ne dépend quant à elle que de la température.

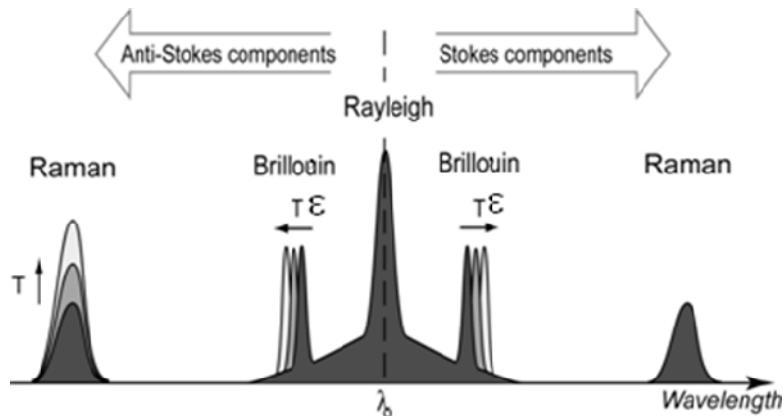


Figure 3. Spectre de lumière rétrodiffusée utilisée dans la mesure distribuée.  $\lambda_0$  est la longueur d'onde de la lumière incidente.

### 2.3. Performances et utilisations

De très faibles déformations du sol, à partir de 0,02%, et des variations de température de 0,1°C peuvent être détectées avec une résolution spatiale de 1 m.

Ce capteur présente également l'avantage d'un très faible encombrement par rapport à des capteurs conventionnels qui, par leur taille, peuvent perturber la zone de sol mesurée.

Cette solution peut être utilisée pour la surveillance de longue durée, la détection précoce d'évènements ou pour une évaluation rapide de la performance d'un ouvrage. Une auscultation continue et permanente à distance peut transmettre des données en temps réel pour évaluation et analyse. Pour chaque projet, des valeurs de déclenchement du système d'alerte peuvent être mises en place. Selon les besoins du projet, il est possible d'avoir accès à l'équipement et aux mesures soit à distance soit manuellement sur le site.

### 3. Retour d'expérience sur les premiers ouvrages instrumentés en 2004

#### 3.1. Culée de pont renforcée par géotextiles

La première culée de pont renforcé par géotextiles et instrumentée est celle du contournement de Saint-Saturnin (72) réalisée en juillet 2004. Cet ouvrage est décrit par Nancey et al. (2006), et Rossi et al. (2006). Trois bandes du capteur géotextile avec fibres optiques et réseaux de Bragg ont été placées sur une section verticale de la culée (Figure 4). L'examen des déformations mesurées montrent une mise en tension de l'ouvrage lors de la construction et lors de son chargement, suivie d'une rapide stabilisation. Les derniers relevés, réalisés fin 2009, montrent un bon comportement de l'ouvrage et une très faible évolution des déformations en service (Figure 5), qui restent dans l'ensemble inférieures à 1%.

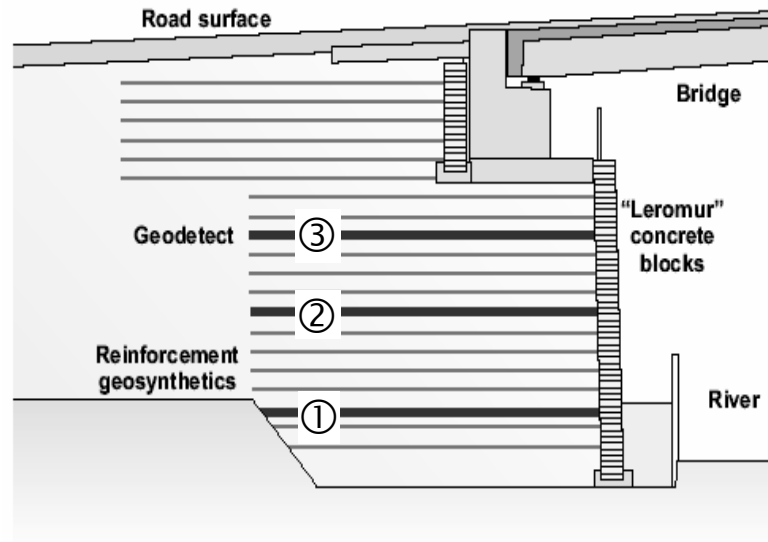


Figure 4. Coupe de la culée de pont de Saint-Saturnin renforcée par géotextile et position des 3 bandes capteur.

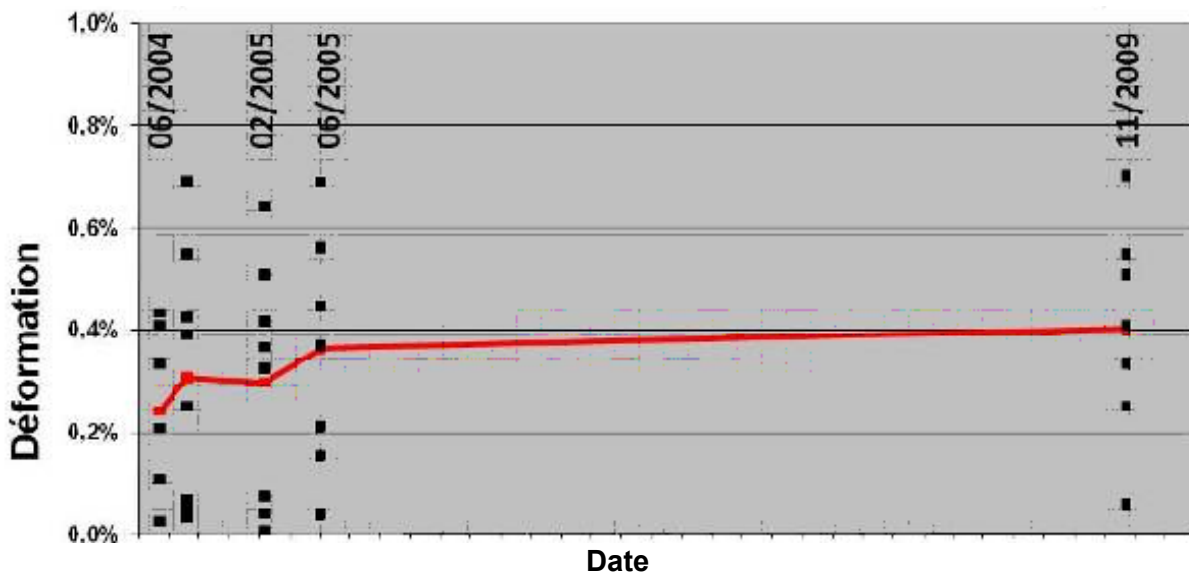


Figure 5. Evolution de la déformation moyenne de la bande n°2 entre 2004 et 2009.

### 3.2. Auscultation et système d'alerte sous remblais sur zone avec présence de cavités

A la suite de la détection d'une faille perpendiculaire à une voie ferrée sur la ligne Mouchard Bourg dans la région de Arbois, la SNCF a décidé de renforcer la zone en y installant le dispositif de renforcement et d'alerte par fibres optiques pour, d'une part, prévenir tout effondrement et limiter les tassements en surface et, d'autre part, détecter les effondrements localisés pour éviter tout risque de circulation de train sur une cavité évaluée à un diamètre de 1,2 m à 1,5 m. Cette zone concerne une portion de 50 m d'une voie simple de 5m de large. La plate-forme sous les rails est constituée de 25 cm de ballast et 50 cm de remblai.

Le capteur géotextile mis en œuvre associe d'une part des capteurs à réseaux de Bragg (FBG) répartis tous les 0,85 m le long de 5 fibres optiques espacées de 0,85 m, et, d'autre part, des câbles de renfort pour augmenter sa résistance et son module en traction, et donc la déflexion à la surface du remblai. Le maillage constitué de 297 réseaux de Bragg disposés en quinconce (Figure 6a) permet de situer une cavité de 1,2 m de diamètre avec deux capteurs différents dans une zone de 16,7 m de long. Une armoire étanche a été placée à proximité de la zone renforcée (Figure 6b) pour y installer le dispositif nécessaire à une surveillance en continu de la zone (Briançon et al., 2006).

Malgré les conditions de chantier difficiles (intempéries, espace de travail limité, circulation d'engins, travail nocturne), la mise en œuvre de la nappe s'est déroulée dans le délai imparti. L'association du dispositif de mesure au géotextile de renforcement apporte une facilité de mise en œuvre, que l'on ne peut pas obtenir avec des capteurs traditionnels.

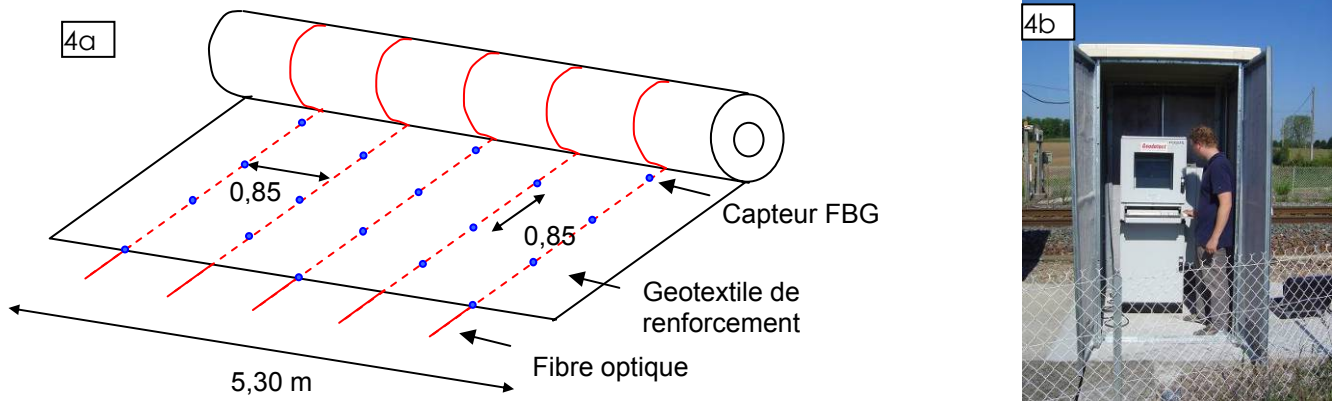


Figure 6. Système d'alerte géotextile à fibres optiques mis en place sous la voie ferrée dans la région d'Arbois. Distribution des fibres optiques et des réseaux de Bragg sur le géotextile de renforcement (a) connectés au dispositif de surveillance en continu (b).

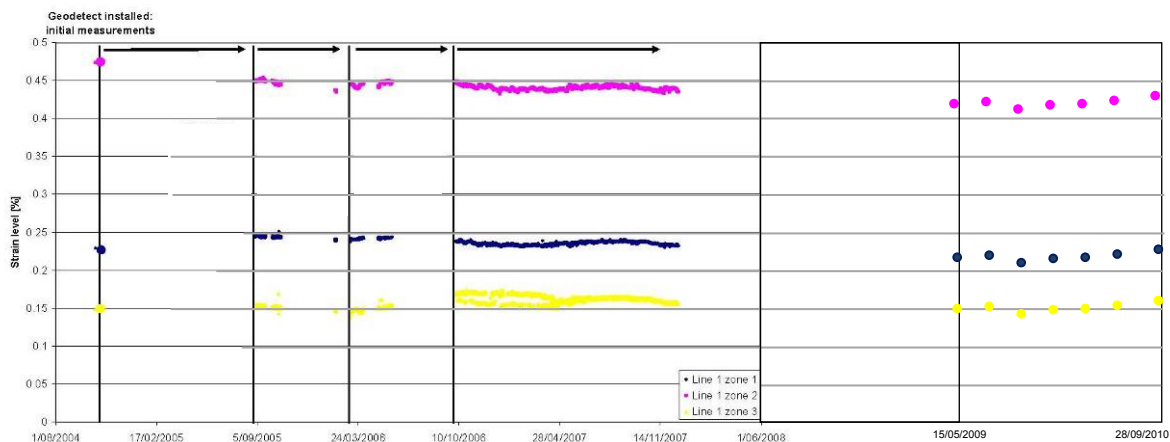


Figure 7. Évolution des déformations mesurées par la ligne 1 sous le remblai ferroviaire d'Arbois entre l'installation en 2004 et septembre 2010.

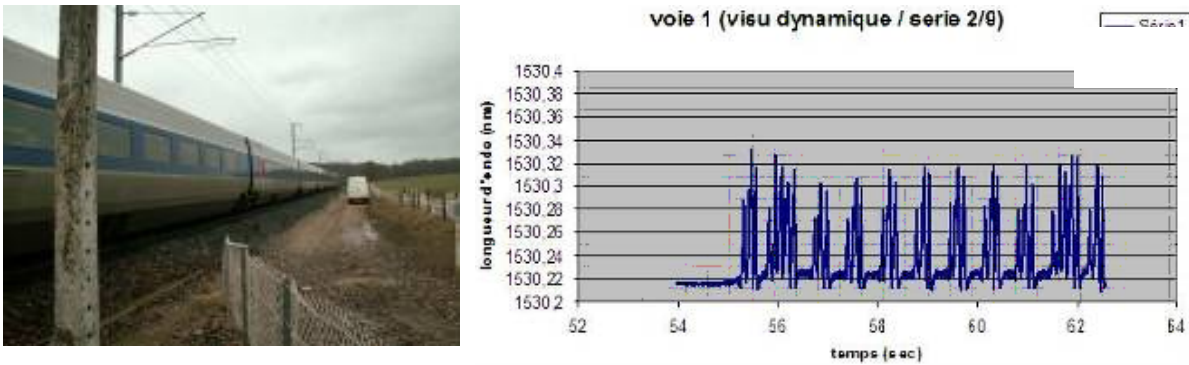


Figure 8. Voie ferrée dans la région d'Arbois. Réponse dynamique du système d'alerte et déformations enregistrées lors du passage des essieux d'un train.

Les déformations enregistrées lors de la mise en œuvre du remblai sont inférieures à 0,5%. Le dispositif est en place depuis plus de 6 ans. Les mesures des capteurs sont stables depuis l'installation et n'évoluent pas significativement. Ainsi, le seuil d'alerte de 2%, correspondant à une déflexion sur le rail de 2 cm, n'a pas été encore atteint (Figure 7). Par ailleurs, le branchement d'une instrumentation dynamique permet une acquisition à haute fréquence des mesures (1kHz) : il est possible de détecter les déformations occasionnées par les essieux des trains, de l'ordre de 0,3% (Figure 8).

#### 4. Auscultation et système d'alerte de digues et levées en terre

Dans les applications hydrauliques, cette solution d'auscultation et d'alerte pour objectif de détecter les deux principales causes de rupture des digues, barrages ou levées de protection contre les crues : instabilité structurelle (glissement, tassement, effondrement) et érosion interne (apparition et augmentation d'un débit de fuite). Ces performances ont été évaluées sur trois ouvrages expérimentaux à l'échelle 1.

Le seuil de détection des fuites percolant à travers une digue en terre homogène est très faible : les essais sur la digue du bassin PEERINE implanté sur le site du Cemagref à Aix-en-Provence décrit plus loin (hauteur : 2,5 m, longueur cumulée : 100 m) ont montré qu'il est inférieur à 0,1 l/min/m (Artières et al., 2007).

Une autre série de 4 expérimentations réalisées au Pays-Bas (IJKdijk-Piping, 2009) est relative à la détection des signes précurseurs d'érosion interne à l'interface entre une digue en remblai argileux et des sols sableux érosifs (Figure 9). Il a été montré que l'apparition de chenaux d'érosion interne est détectable dès le stade du processus d'érosion régressive 5 jours avant rupture, soit 1 jour seulement après le début de l'essai grâce à la thermographie associée à une analyse de données avec des modèles développés par EDF-DTG (Beck et al., 2010). On observe également que la mesure des déformations est un complément indiscutable à la thermométrie pour une meilleure identification et localisation des phénomènes (Fig. 10).



Figure 9. Projet IJKdijk/Piping – Une digue expérimentale avant et après rupture

Une autre expérimentation a été menée dans le cadre du premier projet néerlandais IJkdijk/Macrostabilité au cours duquel une digue instrumentée de 100 m de long et de 6 m de haut a été sollicitée jusqu'à la rupture. Le système d'alerte géotextile-fibres optiques a été le premier dispositif capable de détecter des mouvements fins de l'ouvrage (à partir de 0,02%), et à signaler ces dysfonctionnements deux jours avant la rupture, sur une durée d'essai de 5 jours au total. (Artières et al., 2010b)

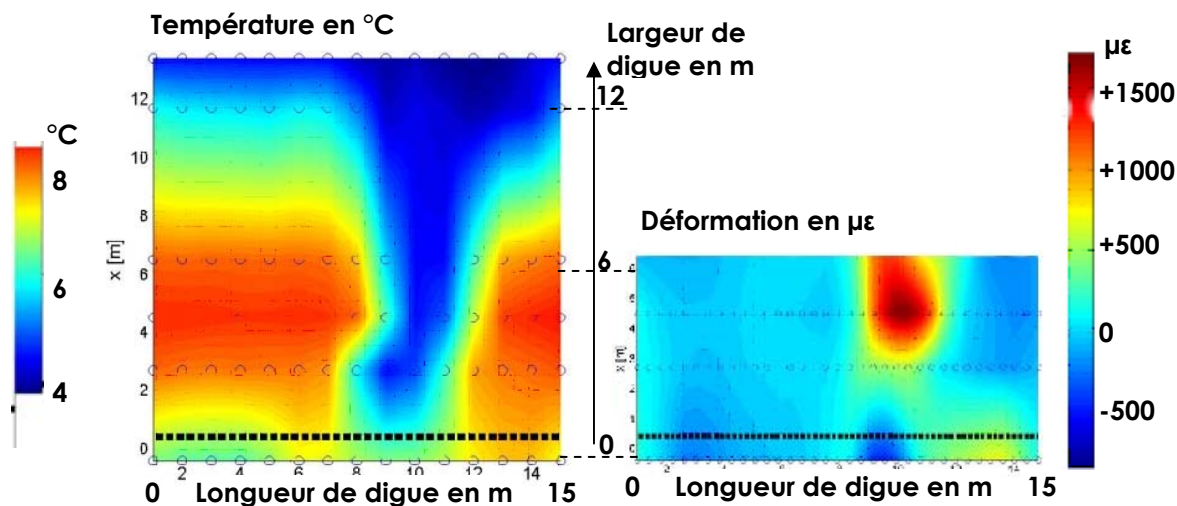


Figure 10. Projet IJkdijk/Piping - Détection du canal d'érosion sous la digue (vue du haut) par mesure simultanée de la température à gauche et de la déformation à droite. (Analyse par *geophyConsult*).



Figure 11. Installation de bandes du capteur géotextile à fibres optiques sur la digue du canal de la Marne au Rhin (a) et sur les digues de protection contre les inondations de la Loire / Authion (b).

D'autres applications dans des ouvrages hydrauliques, sur des digues en eau comme celle du canal de la Marne au Rhin ou sur des digues sèches de protection contre les inondations comme sur la levée de l'Authion (Fig. 11), sont décrites par Artières et al. (2010a).

Grâce à sa grande sensibilité associée aux outils puissants de traitement des données, il s'agit d'une solution performante de détection précoce du dysfonctionnement des digues.

## 5. Auscultation de dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG)

### 5.1. Détection de fuites sous étanchéité mince

Une étude expérimentale a été réalisée sur le bassin PEERINE construit sur le site du Cemagref à Aix-en-Provence pour tester l'aptitude du système optique à détecter des fuites au travers d'une étanchéité mince par géomembrane. D'un volume de 200 m<sup>3</sup>, le périmètre extérieur du bassin est de 118 m en pied et de 78 m en tête (Figure 12). Des ouvertures réalisées à travers l'étanchéité et contrôlées par des débitmètres à débit constant permettent de simuler des fuites artificielles en divers emplacements. Le Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane (DEG) comporte de haut en bas :

- une structure de protection supérieure constituée d'un géotextile non-tissé aiguilleté de protection recouvert de dalles en béton ;
- une géomembrane en PVC de 1 mm d'épaisseur ;
- une structure de protection et de drainage inférieure.

Deux options sont étudiées pour la structure de protection et de drainage inférieure. L'option 1 se compose de (haut en bas) :

- un géotextile de protection non-tissé aiguilleté ;
- une couche de drainage granulaire de 30 cm ;
- un géotextile de filtration.

L'option 2 se compose de (haut en bas) :

- un géospaceur de drainage ;
- un géotextile de filtration.

Ces configurations représentent des structures d'étanchéité habituelles de canaux et bassins. Dans les deux options, 4 bandes du capteur géotextile à fibres optiques sont placées parallèlement à la crête, sur le géotextile de filtration, et à différents niveaux entre le pied et la crête, dont deux bandes à mi-pente (Figure 12). Elles ont pour objectifs de détecter les débits de fuites à travers l'étanchéité. Les fuites artificielles sont positionnées à différents emplacements entre la crête et le pied du talus et peuvent délivrer un débit à partir de 0,2 l/min.

La figure 13 montre le profil de température mesuré par les fibres optiques qui identifie très bien la localisation des fuites artificielles par la bande de pied de talus (courbe bleue) pour l'ensemble des fuites de niveau bas (flèche noire), milieu (flèches mauves) ou haut (flèche rouge). La bande en milieu de pente (courbe verte) localise les fuites du milieu et haut.

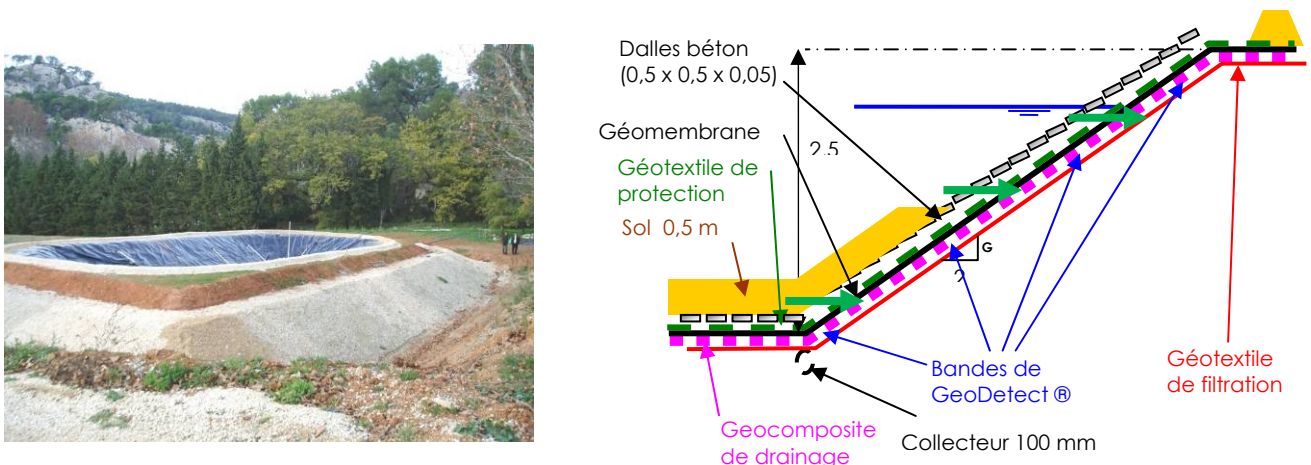


Figure 12. Bassin expérimental PEERINE au Cemagref d'Aix-en-Provence. Coupe du talus avec géospaceur. Flèches vertes : fuites artificielles.

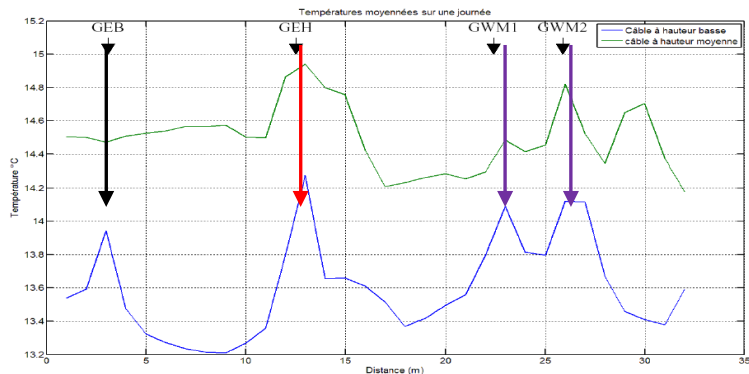


Figure 13. Détection des fuites artificielles (flèches) avec le système géotextile à fibres optiques pour la bande capteur installée en pied (courbe bleue) et en milieu de pente (courbe verte) du talus.



## 5.2. Mesure des déformations au-dessus d'une géomembrane de couverture d'ISD

La réhabilitation en site naturel de l'ancienne installation de stockage de déchets (ISD) d'Amsterdam aux Pays-Bas sur le site Volgermeer polder a requis une étanchéité de couverture par une géomembrane PEHD de 20/10. Le sous-sol tourbeux est compressible. La surface est aménagée en alvéoles de l'ordre de 30 m par 50 m pour reconstituer des petits lacs pour oiseaux d'eau. La géomembrane est lisse en fond de bassin et rugueuse sur les talus. Elle est recouverte d'une couche de sable fin de 50 cm d'épaisseur. Le bassin se remplit progressivement d'eau avec les précipitations sur une période estimée à un an.

L'entreprise Witteveen+Bos en charge de ce projet de réhabilitation débuté il y a plus de 5 ans a souhaité suivre les déformations de la géomembrane d'une alvéole lors de son remplissage en sable de couverture puis d'eau de pluie. Une longueur totale de 450 m de bande capteur géotextile à fibres optiques a été déroulée sur les fonds et les talus de l'alvéole à l'interface entre la géomembrane et le sable. La bande continue est ancrée en tête de talus par recherche de sable à plat. L'interface rugueuse sur les talus permet d'améliorer l'ancrage. La mesure du type distribuée permet de suivre les déformations avec une résolution spatiale de 1 m. Les résultats présentés sur la figure 15 montrent une des déformations mesurées maximales entre 1,5% et 2 %.



Figure 14. Volgermeer polder (NL) – Vue aérienne à gauche. Vue du bassin étanché par géomembrane et instrumenté avec les bandes du capteur à fibres optiques à droite.

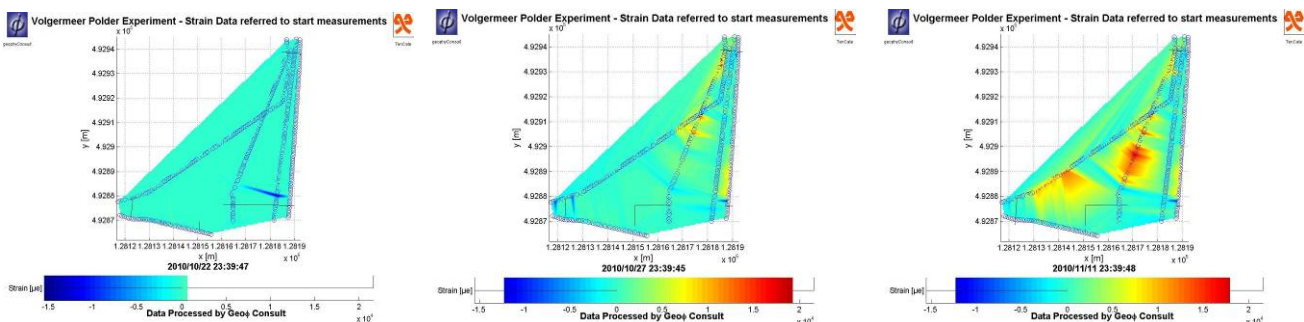


Figure 15. Déformations mesurée au-dessus de la géomembrane de couverture à Volgermeer les 22/10, 27/10 et 11/11/2010 de gauche à droite – Échelle couleur en %. (Analyse par *geophyConsult*).

## 6. Conclusions

La solution d'auscultation et d'alerte par géotextile à fibres optiques décrite dans cet article cumule les fonctions des produits géosynthétiques avec celles des technologies de mesure par fibres optiques les plus récentes, pour offrir des informations essentielles (température et déformation du sol) qui permettent gérer efficacement les ouvrages en terre et les ouvrages hydrauliques, en particulier ceux équipés de géosynthétiques, tant lors de la construction que sur le long terme.

Le retour d'expérience sur les premiers ouvrages en terre équipés de cette solution dès 2004 montre la fiabilité de cette technologie.

L'étendue des applications est très grande. Outre les murs et talus renforcés, les plateformes et les remblais renforcés, cette solution d'auscultation et d'alerte s'avère également très adaptée au suivi et à

l'émission d'alertes dans le cas d'infrastructures longues, comme les routes, les voies ferrées ou les digues. Dans ce dernier cas, la mesure simultanée de la température et de la déformation par la méthode distribuée permet de détecter les signes précurseurs de dysfonctionnement, comme les fuites ou les tassements.

Cette solutions contribue à réduire les risques et peut conduire à des réductions substantielles de coûts.

Développée pour répondre aux exigences spécifiques de chaque projet, elle apporte :

- l'assurance que les matériaux employés satisfont le niveau de performance souhaité ;
- une alerte précoce d'une variation inattendue des propriétés des matériaux ou des conditions locales. Par exemple : augmentation soudaine des contraintes, effondrements, etc. ;
- une solution sur mesure qui donne au maître d'ouvrage des marges de sécurité opérationnelles supplémentaires pour certaines applications de renforcement de sols sensibles, comme par exemple les murs et talus raidis, les zones de sols compressibles ou avec risque d'effondrement (karst ou mine);
- des outils plus efficaces d'auscultation des produits géosynthétiques et des ouvrages en terre dans des applications complexes, conduisant à une meilleure utilisation de l'espace et à une réduction des coûts du projet global ;
- un impact positif sur le développement durable conduisant à des risques moindres et à des structures plus durables, de par sa capacité à ausculter leurs justes performances.

## 7. Références bibliographiques

- Artières O., Bonelli S., Fabre J.-P., Guidoux C., Radzicki C., Royet P., Vedrenne C. (2007). Active and passive defences against internal erosion. Proc.7th ICOLD European Club Dam Symposium. Freising (Munich), Germany, September 17-19, 2007.
- Artières O., Galiana M., Royet P., Beck Y.-L., Cunat P., Courivaud J.-R., Fry J.-J., Faure Y.-H., Guidoux C. (2010a). Fiber optics monitoring solution for canal dykes. Proc. of the PIANC MMX Congress Conf., Liverpool, UK. May 10-14, 2010.
- Artières O., Beck Y.-L., Fry J.-J., Guidoux C., Pinettes P. (2010b). Monitoring of earthdams leaks and stability with fibre-optics based monitoring systems. Proc. 8th ICOLD European Club Symposium on dam safety, Innsbruck, Austria; September 22-23, 2010, pp. 432-437.
- Beck Y.-L., Khan A. A., Cunat P., Guidoux C., Artières O., Mars J., Fry J.-J. (2010). Thermal monitoring of embankment dams by fiber optics. Proc. 8th ICOLD European Club Symposium on dam safety, Innsbruck, Austria; September 22-23, 2010, pp. 444-448.
- Briançon L., Nancey A., Robinet A. (2006). Mise en œuvre d'un système d'alerte intégré à une nappe géosynthétique de renforcement d'une voie ferrée. Rencontres Géosynthétiques 2006, IJkdijk-Piping (2009). 4 pages. Brochure disponible sur le site [www.ijkdijk.eu](http://www.ijkdijk.eu).
- Nancey A., Rossi D., Boons B. (2006). Survey of a bridge abutment reinforced by geosynthetics, with optic sensors integrated in geotextile. Proc. 8th Int. Conf. on Geosynthetics, Yokohama, Japan.
- Rossi D., Faure R. M., Ducol J.-P., Nancey A. (2006). Culée de pont porteuse réalisée avec un mur fait de blocs d'aspect pierre éclatée et renforcé par des géotextiles. Rencontres Géosynthétiques 2006, Montpellier, pp. 429-434.

