

Auscultation d'ouvrages avec un capteur géotextile à fibres optiques

Pour évaluer la sécurité d'un ouvrage en terre, il est indispensable de disposer et de pouvoir interpréter des données d'auscultation, mais les mesures sont parfois difficiles à mettre en place et pas toujours fiables sur le long terme. Avec l'insertion de fibres optiques dans un géotextile, la solution TenCate GeoDetect® est le premier système d'auscultation conçu spécifiquement pour les applications géotechniques. Implantée depuis huit ans avec succès sur de nombreux ouvrages, elle permet d'accéder à des informations jusqu'ici très difficiles à obtenir et ceci avec une grande précision.

L

a 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 (encadré 1).

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 même 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 (Sarthe) décrit dans Nancey *et al.* (2006) et Rossi *et al.* (2006), 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 (Jura). Nous reviendrons sur le comportement à long terme de la solution d'auscultation en place depuis plus de huit ans à Arbois.

Cette solution d'auscultation a été par ailleurs 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.

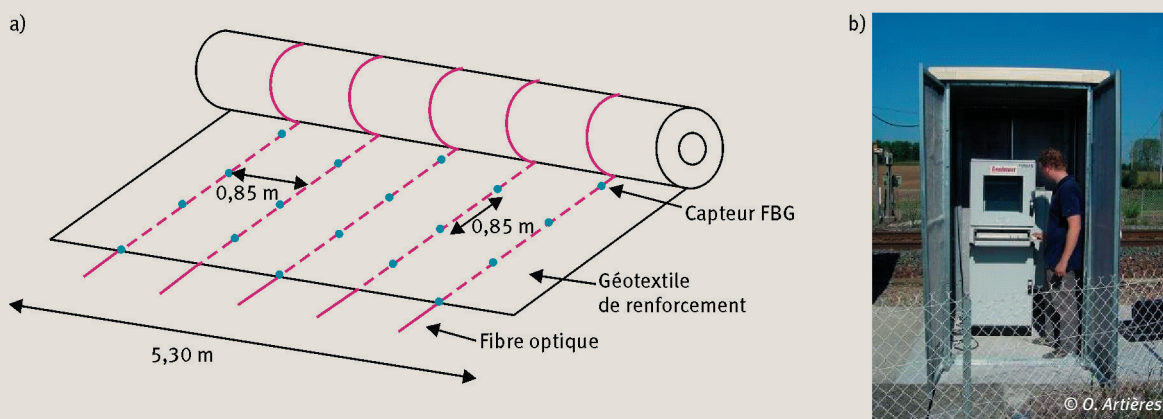
Retour d'expérience sur les premiers ouvrages instrumentés en 2004

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

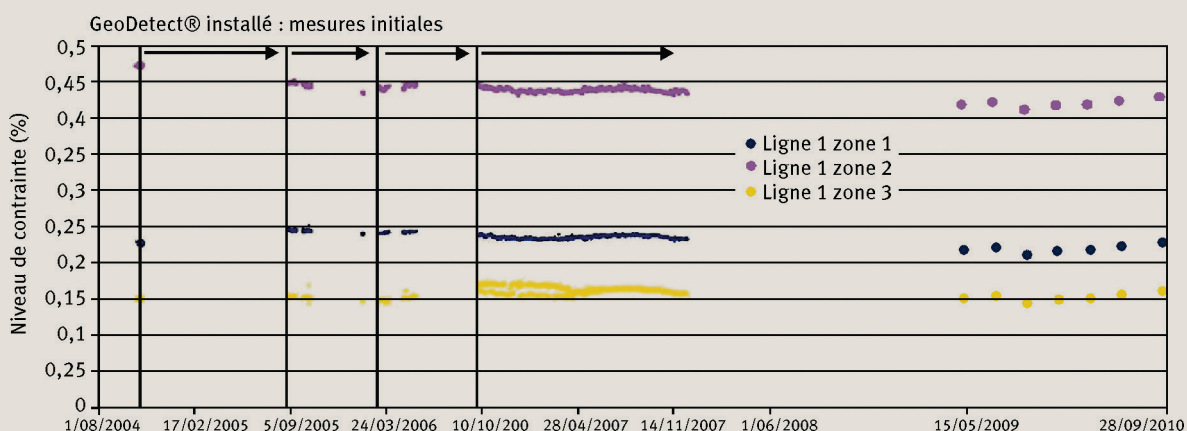
À la suite de la détection d'une faille perpendiculaire à une voie ferrée sur la ligne Mouchard Bourg dans la région de Arbois, la SNCF a décidé de renforcer la zone en y installant le dispositif de renforcement et d'alerte par fibres optiques pour d'une part, prévenir tout effondrement et limiter les 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 5 m 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 cinq fibres optiques espacées

❶ 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).



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



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 ❶a) 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 ❶b) 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.

Les déformations enregistrées lors de la mise en œuvre du remblai sont inférieures à 0,5 %. Le dispositif est en place depuis plus de six 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 ❷). Par ailleurs, le branchement d'une instrumentation dynamique permet une acquisition à haute fréquence des mesures (1 kHz) : il est possible de détecter les déformations occasionnées par les essieux des trains, de l'ordre de 0,3 %.

Auscultation et système d'alerte de digues et levées en terre

Dans les applications hydrauliques, cette solution d'auscultation et d'alerte a 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 d'Irstea 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).

1 LA SOLUTION D'AUSCULTATION ET DE DÉTECTION PRÉCOCE TENCATE GEODETECT®

Cette solution associe une structure géotextile, des câbles optiques (figure 3), une instrumentation et ses logiciels pour offrir une solution très innovante répondant aux besoins des applications géotechniques.

Le capteur

La partie géotextile apporte d'une part ses fonctions hydrauliques et mécaniques, notamment le frottement, 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.

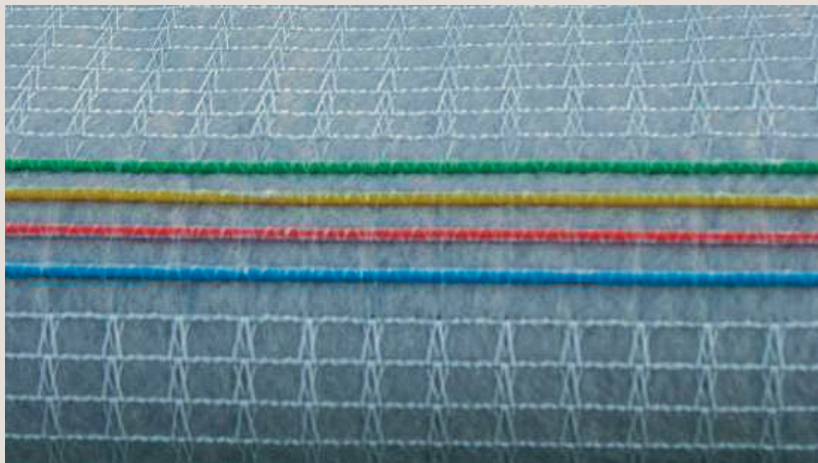
Les fibres optiques permettent la mesure de deux paramètres principaux pour le suivi des ouvrages en terre et des ouvrages hydrauliques que sont la déformation du sol et la température.

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 nantissée 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.

Les fibres optiques, protégées par une gaine, en font un système 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).

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



L'instrumentation optique

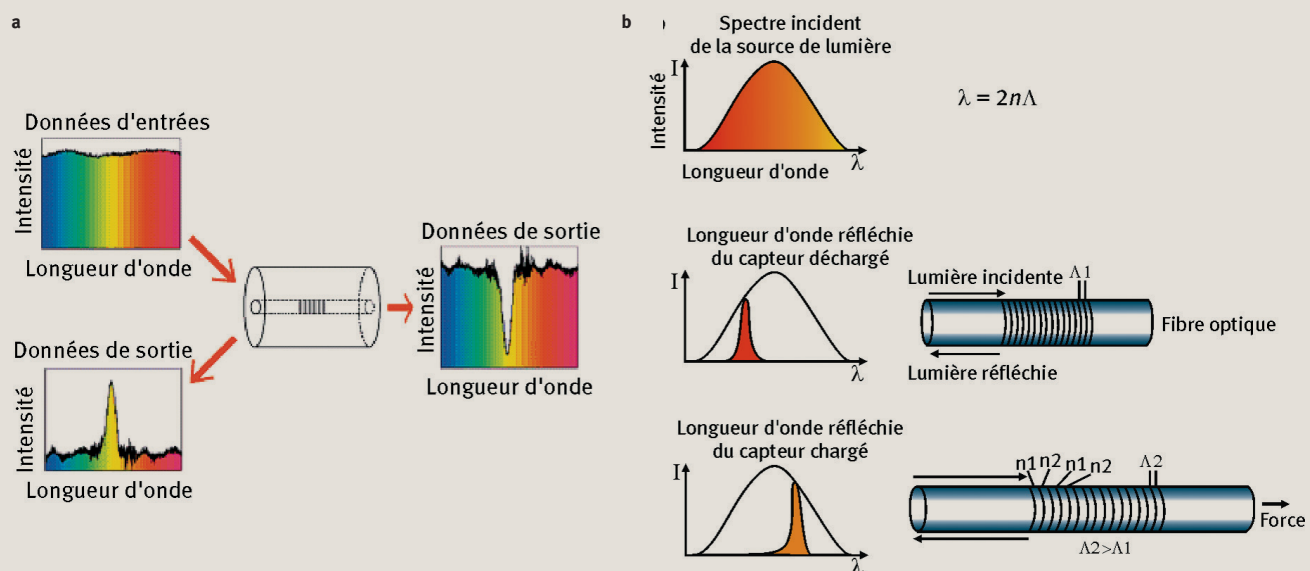
Les réseaux de Bragg et la mesure distribuée Raman ou Brillouin sont des technologies de mesure par fibre optique éprouvées pouvant être intégrées dans cette solution d'auscultation par fibres optiques.

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. L'instrumentation envoie un large spectre de lumière dans la fibre. Chaque réseau de Bragg est identifié par la longueur d'onde λ très précise qu'il réfléchit (figure 4a), tout en se laissant traverser par les autres longueurs d'onde.

Le réseau de Bragg est sensible aux variations de température et de déformation de la fibre optique. Ainsi il est possible de mesurer les variations de déformation et de température du milieu environnant la fibre optique (figure 4b).

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



La mesure distribuée

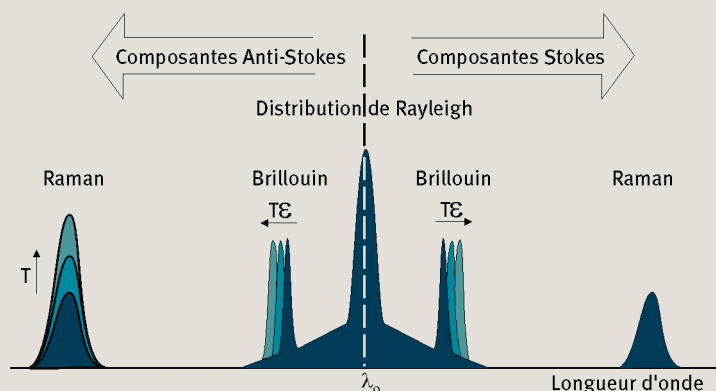
À l'inverse des réseaux de Bragg, la mesure distribuée scrute les variations de température et de déformation en tout point d'une fibre optique standard sur plusieurs dizaines de kilomètres. Un laser envoie dans la fibre une lumière cohérente de longueur d'onde donnée λ_0 . En tout point de la fibre, les hétérogénéités et les vibrations moléculaires de la silice vont rétrodiffuser une faible partie de cette lumière selon le spectre indiqué en figure 5, principalement avec la même longueur d'onde λ_0 que la lumière incidente (pic Rayleigh) et avec des pics secondaires de part et d'autre. Les variations de température et de déformation en tout point de la fibre 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.

Performances et utilisations

De très faibles déformations du sol, à partir de 0,01 %, et des variations de température de 0,1 °C peuvent être détectées avec une résolution spatiale de 1 m ou moins. 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'événements 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.

5 Spectre de lumière rétrodiffusée utilisée dans la mesure distribuée. λ_0 est la longueur d'onde de la lumière incidente.



Une autre série de quatre expérimentations réalisées aux 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 6). Il a été montré que l'apparition de chenaux d'érosion interne est détectable dès le stade du processus d'érosion régressive cinq jours avant rupture, soit un 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

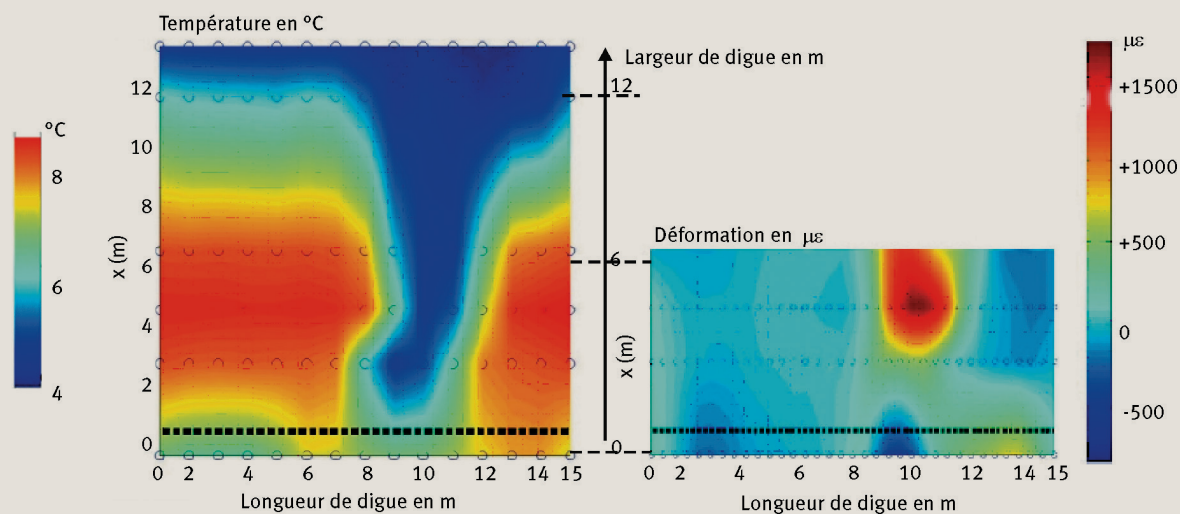
complément indiscutable à la thermométrie pour une meilleure identification et localisation des phénomènes (figure 7).

Signalons que le premier projet néerlandais Ijkdijk/Macrostabiltiy, au cours duquel une digue instrumentée de 100 m de long et de 6 m de haut a été sollicitée jusqu'à la rupture, a montré que 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 cinq jours au total (Artières *et al.*, 2010b).

6 Projet Ijkdijk/Piping – Une digue expérimentale avant et après rupture.



7 Proj et 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*).



► 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, 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.

Détection de fuites sous dispositif d'étanchéité par géomembrane

Une étude expérimentale a été réalisée sur le bassin PEERINE construit sur le site d'Irstea 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 m³, le périmètre extérieur du bassin est de 118 m en pied et de 78 m

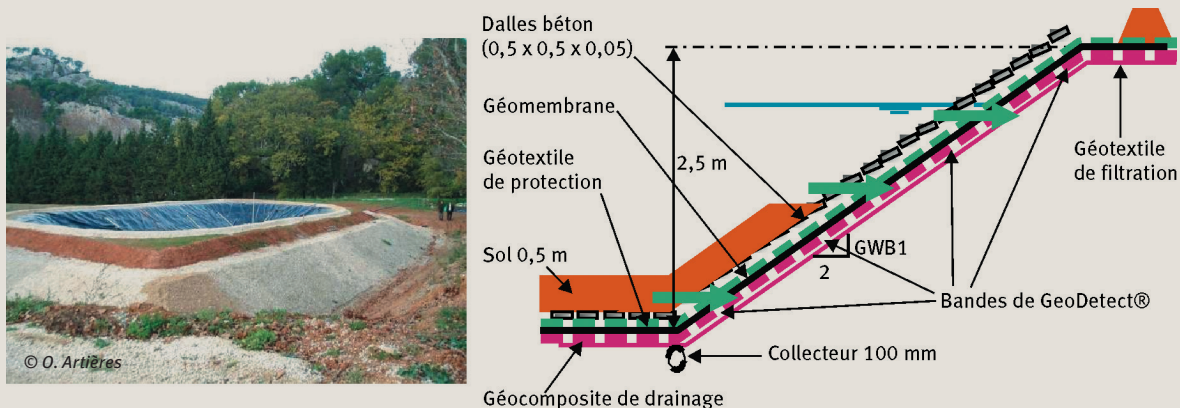
en tête (figure 8). Des ouvertures réalisées à travers l'étanchéité et contrôlées par des débitmètres à débit constant permettent de simuler des fuites artificielles en divers emplacements. Le dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG) comporte de haut en bas :

- une structure de protection supérieure constituée d'un géotextile nontissé 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.

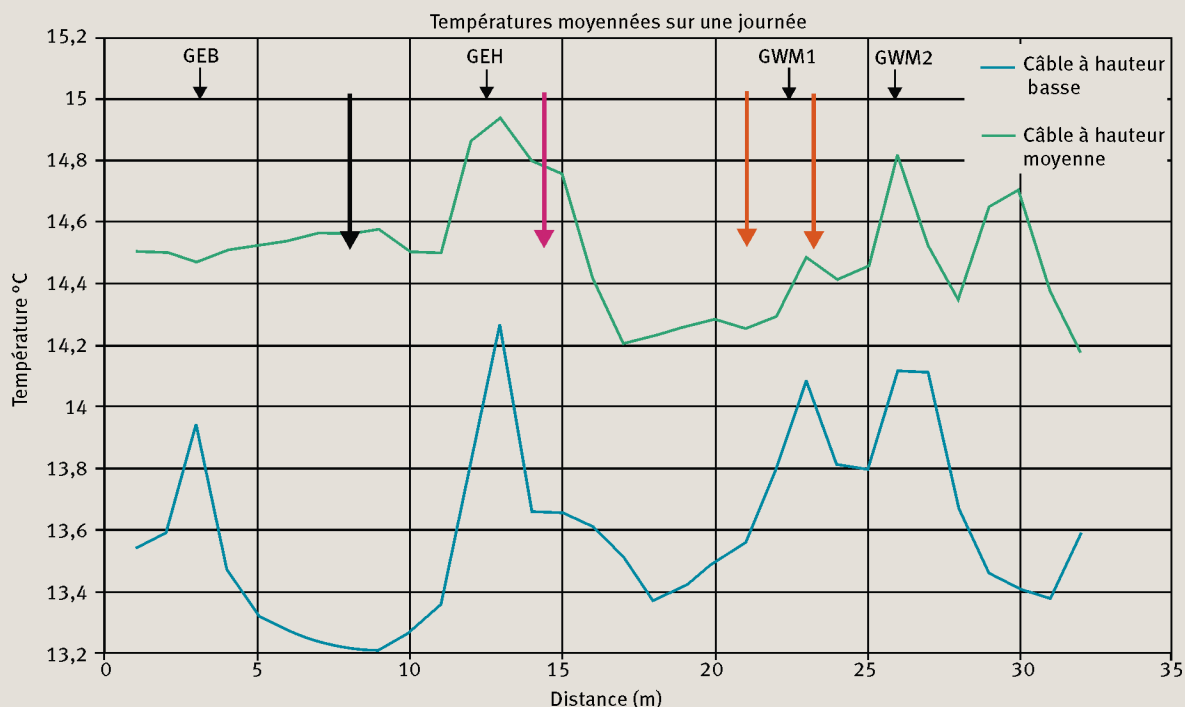
Deux options sont étudiées pour la structure de protection et de drainage inférieure. L'option 1 se compose de (haut en bas) :

- d'un géotextile de protection nontissé aiguilleté,
- d'une couche de drainage granulaire de 30 cm,
- d'un géotextile de filtration.

8 Bassin expérimental PEERINE (Irstea d'Aix-en-Provence). Coupe du talus avec géospaceur. Flèches vertes : fuites artificielles.



9 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.



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

- d'un géospaceur de drainage,
- d'un géotextile de filtration.

Ces configurations représentent des structures d'étanchéité habituelles de canaux et bassins. Dans les deux options, quatre 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 9). Elles ont pour objectif 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 9 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.

Conclusions et perspectives d'utilisation

La solution d'auscultation et d'alerte 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 de 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 solution 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. ■

Les auteurs

Olivier ARTIÈRES

TenCate Geosynthetics, 9 rue Marcel Paul,
BP 40080, 95873 Bezons Cedex

✉ o.artieres@tencate.com

Laurent BRIANÇON

Conservatoire national des arts et métiers,
292 rue Saint-Martin, 75141 Paris Cedex 03

✉ laurent.briancon@cnam.fr

Alain ROBINET

SNCF, Division Expertise Recherche
Innovation, 6 avenue François Mitterrand,
93574 La Plaine Saint-Denis Cedex

✉ alain.robinet@sncf.fr

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- ARTIÈRES, O., BONELLI, S., FABRE, J.-P., GUIDOUX, C., RADZICKI, C., ROYET, P., VEDRENNE, C., 2007, Active and passive defences against internal erosion, in : *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, in : *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, in : *Proc. 8th ICOLD European Club Symposium on dam safety*, Innsbruck, Austria, September 22-23, 2010, p. 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, in : *Proc. 8th ICOLD European Club Symposium on dam safety*, Innsbruck, Austria, September 22-23, 2010, p. 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, in : *Rencontres Géosynthétiques 2006*.

► Consulter l'ensemble des références
sur le site de la revue www.set-revue.fr



Avec l'insertion de fibres optiques dans un géotextile, TenCate GeoDetect® est le premier système d'auscultation conçu spécifiquement pour les applications géotechniques.