

Auscultation des fondations d'un ouvrage en terre par des capteurs à fibre optique

Monitoring earthwork foundations by fibre optic sensors

Artières O.

TENCATE GEOSYNTHETICS, Bezons, France

RÉSUMÉ : La mesure des déformations dans un ouvrage en terre est maintenant plus facile à réaliser en utilisant la technologie des capteurs à fibres optiques, qui associée aux propriétés des géotextiles, comme par exemple leur excellent frottement d'interface avec les sols, permet un bon transfert des mouvements du sol vers le capteur. Leur faible taille moins intrusive que celle des capteurs électromécaniques classiques donne l'accès à des mesures plus fines. Ils ont une sensibilité élevée, inférieure à 0,01% en déformation, mais aussi de 0,1°C en température, combinée avec une haute résolution spatiale de l'ordre du mètre et une bonne durabilité des capteurs dans le sol. Ils sont polyvalents tant pour ausculter des ouvrages locaux, comme des murs ou des talus, que des infrastructures linéaires de plusieurs dizaines de kilomètres, comme les routes, les voies ferrées ou les digues avec la même résolution. Plusieurs dizaines d'ouvrages sont maintenant auscultés depuis plus de 8 ans, preuve de la durabilité de ces capteurs, comme des remblais sur cavité ou sur inclusions. La détection de cavités en fond d'un grand bassin de stockage d'eau industrielle est décrite

ABSTRACT: Strain in earthworks is now easier to measure by using fibre optic sensing technologies combined with geotextile properties, such as very good soil friction interface enhancing the transfer of soil displacement to the sensors. More accurate measurements can be obtained due to their smaller and less intrusive size than those of the usual electro-mechanical strain gages. They have high sensing sensitiveness below 0.01% on strain measurement, but also temperature measurement with 0.1°C accuracy, that is combined with a high spatial resolution in the range of 1 m or less and a good durability of the sensors into soil. They can be used to monitor either local earthworks such as walls and slopes or long infrastructures of several tenths of kilometres such as roads, railways and dikes, all with the same accuracy. Several tenths of earthworks are now monitored globally with this solution for more than 8 years demonstrating its durability, for example on foundations of embankments on piles, cavities or soft soils. The detection of cavities in the foundation of a large polluted water storage basin is described.

MOTS-CLES: Fontis, Cavité, Inclusion rigide, Fondation, Auscultation, Détection, Alerte, Géotextile, Capteur à fibre optique

KEYWORDS: Sinkholes, Piles, Foundation, Embankment, Monitoring, Detection, Warning, Geotextile, Fiber optic sensor.

1 INTRODUCTION

Les capteurs ponctuels de mesure des déformations des ouvrages en terre sont difficiles à installer et occasionnent parfois des problèmes de fiabilité à long terme. Les capteurs à fibre optique solutionnent ces inconvénients. Ils associent les propriétés des géotextiles, comme par exemple un frottement d'interface avec le sol élevé, avec plusieurs technologies de capteurs utilisant les fibres optiques pour mesurer des paramètres importants comme la déformation et la température. Les avantages principaux de cette solution sont sa sensibilité élevée, sa résolution spatiale de l'ordre du mètre voire moins, la durabilité des capteurs dans le sol, leur capacité à mesurer soit des ouvrages ponctuels comme des murs ou des talus, ou de longues infrastructures de plusieurs dizaines de kilomètres comme les routes, les voies ferrées ou les digues, toutes avec la même précision.

Plusieurs dizaines d'ouvrages sont auscultés dans le monde avec cette solution depuis plus de 8 ans, démontrant ainsi sa durabilité. Par exemple, une pile de pont renforcée est auscultée avec succès depuis juillet 2004. A côté des ouvrages en terre, plusieurs ouvrages en terre, tels que bassins, barrages, digues et levées ont été auscultés pour détecter des problèmes de stabilité et de fuite.

Après avoir introduit les principes de la solution d'auscultation et les principaux résultats obtenus sur plusieurs projets anciens, cet article se concentrera sur son emploi pour ausculter les fondations de remblais sur cavités : seront décrits en premier lieu, une section de voie ferrée auscultée en continu

depuis octobre 2004, puis la fondation d'un grand bassin de stockage d'eau ausculté depuis 2011.

2 LA SOLUTION D'AUSCULTATION

Les capteurs à fibre optique ont été largement utilisés depuis plusieurs années dans les applications de génie civil, en particulier pour la surveillance des conduites d'hydrocarbure, dans des systèmes de surveillance de l'état de structure, ou des applications hydrauliques comme des barrages ou des digues en béton ou en terre. En associant des fibres optiques sur un géotextile (Figure 1), TenCate GeoDetect[®] est un capteur géotextile innovant qui améliore les performances des fibres optiques lorsqu'elles sont utilisées en contact avec le sol, du béton ou du bitume : le géotextile crée une excellente interface d'ancrage avec le milieu environnant. Grâce au très bon ancrage du géotextile dans le sol et à la bonne liaison des câbles optiques sur le géotextile, de très faibles déformations du sol peuvent être détectées. Cette interface de frottement améliore également le transfert des mouvements de géotextile vers la ligne optique. De plus, et quand cela est nécessaire, des propriétés de renforcement et raideurs en traction élevées peuvent être associées au capteur comme cela est indiqué au §3.

Différentes technologies de capteurs par fibre optique peuvent être utilisées : les réseaux de Bragg (Fiber Bragg Gratings ou FBG) employés dans le premier exemple d'application au §3, ou la mesure répartie décrite dans le deuxième exemple d'application au §4.

Les réseaux de Bragg sont des modifications locales de l'indice optique à l'intérieur de la fibre optique sous forme d'une série de petits miroirs inscrits sur une distance de quelques millimètres de long et réfléchissant une longueur d'onde donnée, proportionnelle à la température et à la déformation. A l'inverse des réseaux de Bragg qui sont des mesures ponctuelles, les technologies réparties Brillouin ou Raman mesurent tout point le long de la fibre sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres. Ces deux technologies permettent une mesure très précise de paramètres comme la température ou la déformation, avec des fréquences de mesure soit statiques (< 1 Hz) soit dynamiques (de 1Hz à 2 kHz).

La solution d'auscultation comprend le capteur géotextile à fibres optiques, l'instrumentation et le logiciel d'acquisition de données (Figure 1). Différentes stratégies d'auscultation peuvent être prévues lors du dimensionnement, comme une auscultation périodique ou continue à des fins d'alerte précoce.

En comparaison avec des techniques d'auscultation existantes constituées de capteurs ponctuels câblés individuellement, cette solution mesure en continu jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de points avec une seule instrumentation sur toute la longueur de la structure. La résolution spatiale peut être dans certains cas de 0,5 m. Dès son installation, le capteur géotextile à fibre optique peut acquérir des valeurs de déformation et de température : la résolution en déformation est inférieure à 0,01% et des variations de température inférieures à 0,1°C peuvent être mesurées avec les logiciels correspondants. La technologie de mesure par fibres optiques ne nécessite aucune calibration avant mesure, seulement une compensation de la température peut être nécessaire pour des amplitudes supérieures à 10°C.

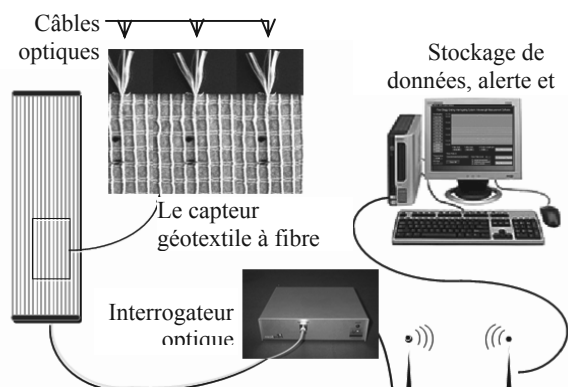


Figure 1. Composants du système d'auscultation

3 SYSTÈME D'ALERTE SOUS VOIE FERRÉE

A la suite de la détection de failles perpendiculaires à la voie ferrée entre Mouchard et Bourg dans la région d'Arbois (France), la SNCF a décidé de renforcer la zone suspectée active avec un système de renforcement et d'alerte par fibres optiques, à la fois pour éviter tout effondrement et rupture dommageable au niveau de la voie, et d'autre part pour détecter et éviter tout passage de train au-dessus d'une cavité de taille supérieure à 1,5 m. La surface couverte est une section à voie unique de 50 m de long et de 5 m de large. La plateforme est construite avec 25 cm de ballast sur 50 cm de sol.

Le capteur géotextile à fibre optique qui a été installé sur cette section en 2004 combine à la fois des câbles optiques et des câbles de renforcement pour augmenter la résistance et la raideur en traction, et réduire la déflexion à la surface du remblai (Figure 2). La technologie optique utilisée est celle des réseaux de Bragg (FBG) inscrits dans la fibre qui mesurent directement les modifications de déformation en renvoyant une variation de longueur d'onde. Ce sont 297 FBG qui quadrillent la zone et qui permettent de localiser des cavités de 1.2 m de diamètre avec deux FBG différents. Une armoire étanche est

placée à proximité de la zone renforcée pour protéger l'interrogateur et les systèmes de communication à distance utilisés pour ausculter la zone en continu (Briançon et al., 2006).

Malgré des conditions de mise en place difficiles (pluie, zone de travail exigüe, travail de nuit), le panneau de capteur a été installé dans les délais impartis. L'association du système de capteur avec le géotextile de renforcement améliore la facilité d'installation qui pourrait difficilement être atteinte avec des capteurs locaux conventionnels.

Les déformations mesurées lors de la construction du remblai sont inférieures à 0,5%. Le système d'alerte est installé depuis plus de 8 ans. Les mesures sont stables depuis la remise en service de la voie. La valeur seuil fixée à 2% de déformation, correspondant à une déflexion de 2 cm au niveau du rail n'a pas encore été atteinte. Aussi, le branchement d'un interrogateur dynamique permet d'acquérir des données avec une fréquence élevée (1 kHz), ce qui permet de mesurer des variations de déformation d'environ 0.3% lors du passage d'un train.

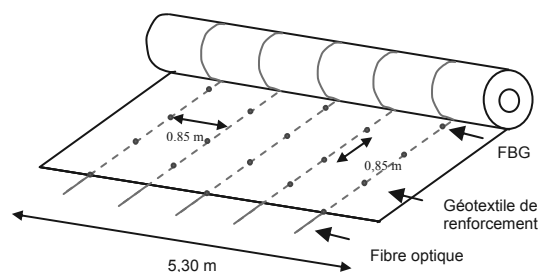


Figure 2 : Le capteur géotextile à fibres optiques renforcé

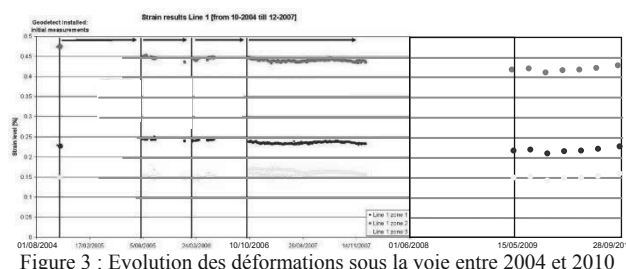


Figure 3 : Evolution des déformations sous la voie entre 2004 et 2010

4 L'AUSCULTATION DES FONDATIONS D'UN BASSIN

4.1 Description

L'objectif de ce bassin est le stockage d'eau salée industrielle pendant environ 6 mois sur 12 pour pouvoir la relarguer dans la rivière voisine lorsque celle-ci est en crue (en hiver) afin d'obtenir un taux de dilution suffisant. La surface totale du bassin est de 30 ha et a une capacité de stockage de 300 000 m³ pour une hauteur d'eau maximum de 10,7 m. Il est construit à l'endroit d'une ancienne gravière à proximité d'une rivière et est délimité par une digue périphérique de 2 km fondée sur le sol naturel en dehors de la gravière. Le fond du bassin est à 4 m en-dessous du sol naturel. Il est sous le niveau de la nappe et pour cette raison étanché en fond et sur les talus par une structure d'étanchéité incluant une géomembrane PEHD de 2 mm protégée par des géotextiles et un tapis drainant granulaire en fond. Les conditions géologiques et hydrologiques, ainsi que la conception de ce bassin sont décrites en détail dans une autre publication (Artières et al. 2013).

4.2 Observations

Une augmentation des concentrations de produits salés correspondant au même type que ceux stockés a été détectée en 2008 dans l'eau de pompage de rabattement de nappe sous le bassin. Après vidange du bassin, des tassements ont été

observés dans les casiers E1 et D1 le long de la ligne de collecte des sources (Figure 4). Le contexte hydrogéologique de cette zone est très complexe. On a supposé une dissolution du chapeau sulfaté de la dolomie profonde par des eaux salées. Ces tassements étaient visibles sur la géomembrane sous la forme d'une déchirure de 15 cm par 3 cm et étaient dus à un fontis de 6 m² et de 3 m de profondeur. Ceci a expliqué les raisons des fuites. Sur trois autres endroits, le substratum argileux était décomprimé. A partir d'une analyse topographique, la surface totale d'effondrement a été estimée à environ 1500 m³ autour des sources.

4.3 Travaux de réparation

Il a été décidé une réparation du fond de la zone du bassin présentant un risque élevé de tassement en installant une structure de renforcement de la fondation par géotextile, associée à un système de détection et de localisation des fontis par capteur géotextile à fibre optique. Dans ce projet, la fonction renforcement a été dissociée de la fonction auscultation.

Le géotextile de renforcement évite à la fois que le fontis atteigne de façon soudaine la structure d'étanchéité et que la géomembrane s'allonge au-dessus d'une valeur seuil permettant de maintenir la fonction étanchéité jusqu'à ce que la cavité soit traitée. Il est dimensionné selon l'Eurocode 7 (2005). Aux états limites ultimes (ELU), les justifications sont menées en utilisant l'approche de calcul 2, avec les coefficients partiels définis dans l'Annexe Nationale [NF EN 1997-1 /NA] de l'Eurocode 7.

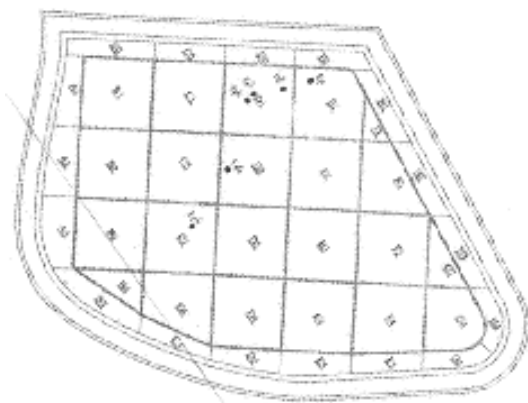


Figure 4. Numérotation des casiers et sortie des sources

La méthode de dimensionnement est une méthode simplifiée (Blivet et al. 2001) développée après le programme de recherche RAFAEL. Le dimensionnement du géotextile a été conduit en appliquant les trois états limites : un de service et deux ultimes à court et long terme (Artières et al. 2013). Le calcul aboutit à une raideur élevée ($J=11000$ kN/m). Le géotextile mis en place est un tissu polyester TenCate Geolon PET 1600 avec une résistance en traction de 1600 kN/m selon la méthode d'essai EN ISO 10319.

Le capteur de déformation est installé sous le géotextile de renforcement pour détecter de façon précoce, localiser et suivre les mouvements du sol sur cette zone, et enfin, estimer la taille des fontis pour vérifier la compatibilité avec la taille de cavité utilisée dans les hypothèses de dimensionnement du géotextile de renforcement.

La structure reconstruite sous la structure d'étanchéité par géomembrane comprend de haut en bas : 60 cm de gravier 0/20 mm (tapis drainant), le géotextile de renforcement, 20 cm de gravier 0/16 mm et le système d'auscultation.

4.4 Le capteur géotextile à fibre optique

Le capteur se présente sous forme de bandes géotextile de 76 cm de large portant 2 câbles optiques pour la mesure des déformations, la première étant la ligne principale, la deuxième

étant une ligne redondante de sécurité. La distance entre les deux câbles de déformation est de 0.6 m (Figure 4). Ces capteurs sont reliés par un câble de liaison de 200 m de long à un interrogateur optoélectronique Brillouin installé dans une cabine en tête de digue. Il n'y a donc aucun appareil électromécanique ni de source électrique dans le bassin. Cette solution est décrite plus en détail dans d'autres publications (Artières et al. 2011, Artières et Dortmund 2011).

L'interrogateur connecté à une extrémité de la fibre optique envoie un pulse laser de quelques nanosecondes qui parcourt toute la longueur de la fibre optique. En chaque point de la fibre optique, le pulse laser interfère avec la structure moléculaire de la matière en rétrodiffusant en sens inverse un spectre de lumière schématisé en figure 5. La longueur d'onde des pics secondaires Brillouin dépend notamment de l'état de déformation de la fibre optique. La résolution spatiale de la fibre est d'environ 1 m et la résolution sur la mesure de la déformation est inférieure 0,01 %.

L'interrogateur optique connecté à une extrémité de la fibre optique envoie un pulse laser que quelques nanosecondes qui est guidé tout au long de la fibre optique. A tout point de la fibre, le pulse laser interfère avec la structure moléculaire du matériau en rétrodiffusant un spectre de lumière (Figure 5). Les pics de longueur d'onde secondaires Brillouin dépendent de la déformation de la fibre et de sa température. La résolution spatiale le long de la fibre est d'environ 1, ce qui signifie que le système génère un point de mesure tous les mètres. La résolution de la mesure de la déformation est de moins de 0,01%.

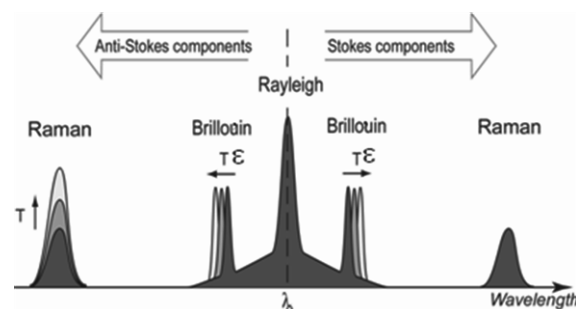


Figure 5. Spectre de lumière rétrodiffusé lors de la mesure répartie sur fibre optique (λ_0 est la longueur d'onde de la lumière incidente)

4.5 Conception et mise en œuvre de l'auscultation

Une surface d'environ 10.000 m² présente un risque de tassements liés à la remontée aléatoire de cavités souterraines. La solution d'auscultation est implantée sur une zone particulière d'environ 165 m x 20 m incurvée couvrant les casiers E1, D1 et C1 (Figure 6).

Sur cette surface, 18 bandes du capteur géotextile à fibres optiques ont été installées en 5 boucles optiques distinctes permettant de lire l'une indépendamment des autres. Les bandes sont espacées l'une de l'autre de 1,2 m correspondant à la taille minimale de cavité à détecter. Les deux câbles optiques de déformation portés par chaque bande sont raccordés séparément, ce qui constitue un total de 5 boucles principales et de 5 boucles redondantes de sécurité. Ces dix boucles sont raccordées à un câble optique de liaison de 200 m de long vers l'instrumentation. Ce sont environ 6,000 points de mesures qui couvrent la surface totale avec un pas de 0.6 m x 1 m.

Les bandes de capteur composite géotextile à fibres optiques sont déroulées sur le site selon un plan de calepinage approuvé par le Maître d'Ouvrage. Les bandes sont immédiatement lestées temporairement jusqu'à la fin de l'installation du système d'auscultation (Figure 7). La continuité des lignes optiques est contrôlée avant la pose du gravier de couverture 0/16 et du géotextile de renforcement (Figure 8).



Figure 6. Vue depuis la crête de digue du bassin et de la zone instrumentée (en clair au centre).



Figure 7. Pose de bandes capteur en fond de bassin.



Figure 8 : Installation du géotextile de renforcement.

4.6 Mesures

Le bassin a été ausculté dès la fin de l'installation du système géotextile à fibre optique en mai 2011 mettant en évidence l'effet de la mise en place de la couche de remblai de 80 cm puis du remplissage en eau du bassin.

Les déformations principales ont été enregistrées lors de la mise en place du remblai qui s'explique par la rugosité importante du fond de forme et la mise sous tension des bandes capteur. Un évènement pluvieux intervenu lors de la pose des capteurs avait en effet érodé la surface du fond de forme. La moyenne des déformations est de l'ordre de 0,2% avec des pointes autour de 1% et une forte irrégularité. Un remblaiement sur support plan créé généralement des déformations initiales inférieures à 0,1%. Cette mesure a été choisie comme ligne de référence par le Maître de l'Ouvrage pour le suivi du bassin.

Le remplissage du bassin à 6 m d'eau en décembre 2011 et en novembre 2012 ne montrent pas d'accroissement sensible des déformations, en moyenne inférieures à 0,1% avec quelques points très localisés entre 0,1 et 0,4 %, ceux-ci étant encore certainement liés à la mise en place des capteurs sur le fond de forme (Figure 9).

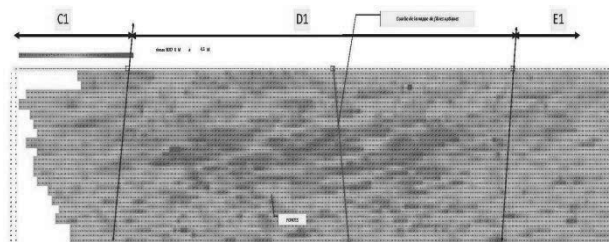


Figure 9. Evolution des déformations entre mai 2011 et novembre 2012

5 CONCLUSION

L'association d'une structure de renforcement par géotextile avec un système d'auscultation pour détecter les mouvements du sous-sol est une solution utilisée avec succès depuis plus de huit ans sous un remblai ferré sujet à des risques de remonté de fontis.

Cette solution a également été utilisée pour stabiliser la fondation d'un bassin industriel étanché par une géomembrane après que des tassements aient été constatés. Une structure de renforcement par géotextile a été conçue sous la structure d'étanchéité pour réduire les déformations de la géomembrane pour des tailles de cavité de 3 m. En complément, un système d'auscultation basé sur des capteurs composites géotextile à fibres optiques a été positionné en-dessous pour détecter de façon précoce et localiser les effondrements, suivre l'évolution de la taille des cavités et éventuellement planifier une opération de maintenance si leur taille dépasse les hypothèses de dimensionnement du géotextile de renforcement. La solution d'auscultation a indiqué le développement de déformations lors des réparations à cause de la rugosité élevée du fond de forme, mais aucune déformation liée à un fontis n'est apparu depuis un an et demi après son installation.

6 REMERCIEMENTS

L'auteur remercie Valérie Lefèbvre-Mignon, Arcadis, assistance à la Maitrise d'ouvrage, pour son aide.

7 REFERENCES

- Artières O., Briançon L. and Robinet A. 2011. Auscultation d'ouvrages en terre avec un système de détection et d'alerte par fibre optique. Comptes-rendus du colloque Rencontres Géosynthétiques 2011, Tours, 23 et 24 mars 2011, pp. 197-207.
- Artières O. and Dortland G. 2011. Six years earthworks monitoring with a fiber optic geotextile enabled sensor. Proceedings of the 8th International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics, Berlin, September 12-16, 2011.
- Artières O., Lefèbvre-Mignon V. and Nancey A. 2013. Auscultation d'un fond de bassin renforcé par géotextile. Proceedings of the 9th conference on Geosynthetics, Rencontres 2013, April 9-11, Dijon, France.
- Blivet J.C., Khay M., Gourc J.P., Giraud H. 2001. Design considerations of geosynthetics for reinforced embankments subjected to localized subsidence. Proceeding of the Geosynthetics'2001. Conference, February 12-14, 2001, Portland, Oregon, USA, 741- 754.
- L. Briançon; A. Nancey; A. Robinet; M. Voet 2006. Set up of a warning system integrated inside a reinforced geotextile for the survey of railway in "Proc, IGC 8th", Sept.18-22, Yokohama, Japan 857-860; 2006.
- NF EN 1997-1 (2005) /NA. Eurocode 7 — Calcul géotechnique — Partie 1: Règles générales - Annexe Nationale à la NF EN 1997-1:2005. AFNOR