

# GEODETECT : RETOUR D'EXPÉRIENCE APRÈS TROIS ANNÉES D'UTILISATION DANS LE SOL

## GEODETECT : FEEDBACK AFTER TREE YEARS OF USE IN SOIL

Alain NANCEY <sup>1</sup>, Laurent BRIANÇON <sup>2</sup>, François CAQUEL <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Bidim Geosynthetics SAS, Bezons, France

<sup>2</sup> CNAM

<sup>3</sup> LRPC NANCY

**RÉSUMÉ :** « *Geodetect* » est un système innovant pour la mesure des déformations dans le sol, basé sur la technologie optique avec l'insertion de fibres dans un géotextile de renfort. Lors de son développement, de nombreux tests et expérimentations ont été réalisés, notamment au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy et à l'Université de Grenoble. D'abord sont présentés le principe de la mesure de déformation par réseau de Bragg et la description du système, puis les résultats des tests ayant permis sa validation, ainsi que le retour d'expérience sur les chantiers réalisés depuis 2003.

**Mots-clés :** déformation, mesure, renforcement, instrumentation, durabilité.

**ABSTRACT –** « *Geodetect* » is an *innovative system* for the strain measurement in soil. It is based on the optic technology with optic fibres embedded in reinforcement geosynthetic. During the development, numerous tests and experiments have been carried out, particularly at the Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy (LRPC Nancy) and at the University of Grenoble. After the description of the system and the principle of the strain measure with fibre Bragg gratings, are shown the results of the tests that allow the validation, as well as a general feedback on the real jobs installed since 2003.

**Keywords:** strain, measure, reinforcement, monitoring, durability

## 1. Introduction

La mesure de la déformation d'un géotextile a souvent posé de nombreux problèmes, en particulier pour l'installation et la fixation des capteurs au produit, ceux-ci pouvant également perturber la mesure en raison de leur taille. De même, la durabilité des systèmes de mesures a toujours été très limitée dans le temps. Mais aujourd'hui, le besoin de surveillance ou la meilleure compréhension du comportement des ouvrages justifie la recherche d'outils de mesure plus performants, faciles à installer et permettant une utilisation à long terme. C'est dans ce contexte, qu'un nouveau système, appelé Geodetect, basé sur l'utilisation de fibres optiques a été développé. Le projet de développement a obtenu le label "Eureka  $\Sigma 2579$ " en 2002 et a reçu le soutien de la DRAST (Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Équipement) et de l'ANVAR (Agence Nationale pour la Valorisation de la Recherche du Ministère de l'Industrie).

En 2004 et 2005, ce système a été installé sur plusieurs chantiers dans le monde confirmant les performances mis en évidence lors du développement. L'expérimentation du LRPC Nancy réalisée en 2002, s'est poursuivie en 2003 avec des phases supplémentaires de chargement de l'ouvrage et par une visite du site en septembre 2005, soit après trois années dans le sol.

## 2. Description du système

### 2.1. Principe de la mesure, définition d'un réseau de Bragg

Un réseau de Bragg est une modification locale d'une fibre optique permettant de moduler l'indice de réfraction de façon périodique ou quasi-périodique.

Cette modification a pour effet de réfléchir une longueur d'onde prédéterminée du faisceau lumineux tout en se laissant traverser par les autres longueurs d'onde. Un réseau de Bragg est donc un filtre dont la particularité est d'être sensible aux variations de température et de déformation auxquelles est soumise la fibre optique. Un réseau de Bragg peut donc aussi constituer un capteur. La courbe d'étalonnage d'un

capteur (figure 1) montre que le déplacement de la longueur d'onde est proportionnel à la déformation de la fibre.

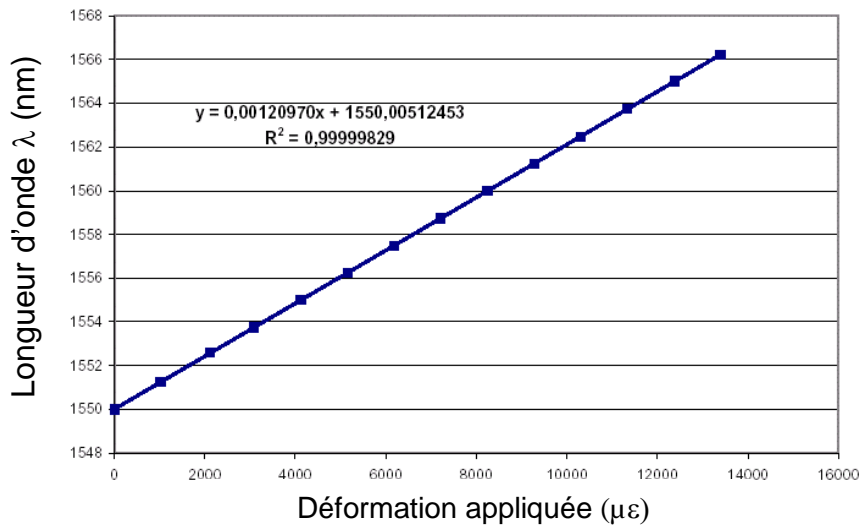


Figure 1. Corrélation déformation – déplacement de longueur d'onde d'un réseau de Bragg.

La relation entre la déformation et la longueur d'onde est la suivante :

$$\varepsilon (\%) = 0,083 \cdot \Delta \lambda (\text{nm}) \quad (1)$$

La précision de lecture avec l'appareil standard de mesure est  $\pm 32$  pm soit 0,003% de déformation. L'effet de la température a également été étudié. La relation entre la température et la longueur d'onde est la suivante:

$$\Delta \lambda (\text{nm}) = 0,0106 \cdot \Delta T (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

Une variation de température,  $\Delta T = 10^\circ \text{C}$  pour une fibre non sollicitée provoque un déplacement de longueur d'onde  $\Delta \lambda = 0,106$  nm, ce qui correspondrait à une déformation  $\Delta \varepsilon = 0,01$  % à température constante. Une compensation en température n'est généralement pas nécessaire pour une utilisation dans les sols où les variations de température sont faibles dans la plupart des cas. Cependant, elle peut être réalisée avec un capteur isolé mécaniquement.

## 2.2. Mise en série de plusieurs capteurs

La réponse de plusieurs capteurs « réseau de Bragg » différents peut être accessible simultanément en plaçant plusieurs réseaux en série sur une seule fibre optique. C'est un avantage important de cette technologie par rapport aux capteurs traditionnels qui nécessitent chacun un raccordement au système d'acquisition. Le nombre de réseaux différents dépendra de la largeur de bande disponible et de l'amplitude du déplacement attendu pour chaque réseau.

La mise en parallèle de plusieurs fibres optiques est également possible (figure 2), permettant ainsi une distribution spatiale des capteurs dans un ouvrage et leur interrogation par une seule unité de mesure. Le système de mesure de déformation peut donc être composé d'une ou plusieurs fibres optiques contenant un ou plusieurs capteurs « réseaux de Bragg ». Un commutateur optique doit alors être utilisé pour raccorder plusieurs fibres optiques à la source lumineuse et au spectromètre qui mesure les longueurs d'ondes réfléchies. Cet appareil permet de scruter toutes les lignes connectées les unes de manière séquentielle.

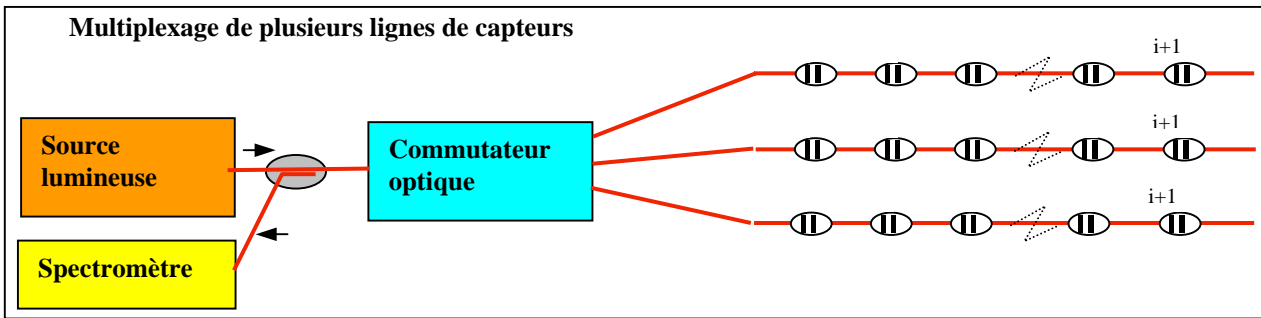


Figure 2. Schéma fonctionnel d'un système de mesure à fibres optiques et réseaux de Bragg

### 2.3 Le système de mesure

Le système de mesure est donc composé, d'une part, d'un géosynthétique dans lequel sont insérées des fibres optiques à réseaux de Bragg et d'autre part des appareils de mesures, d'acquisition et d'analyse des données. Les fibres optiques sont assemblées avec la nappe géotextile dans la phase d'intégration des câbles de renfort (Figure 3). Le fait de disposer d'un dispositif de mesure directement intégré au géotextile apporte une facilité de mise en œuvre que l'on ne peut pas obtenir avec des capteurs traditionnels. Le dispositif d'acquisition des mesures est constitué d'un appareil de mesure portable, piloté par ordinateur, permettant de suivre simultanément la réponse spectrale des lignes optiques comportant des réseaux de Bragg (1 à 16 lignes). Lorsque le risque ne justifie pas une surveillance en continu, des mesures ponctuelles sur un ouvrage instrumenté peuvent être faites à l'aide d'un appareil portable.

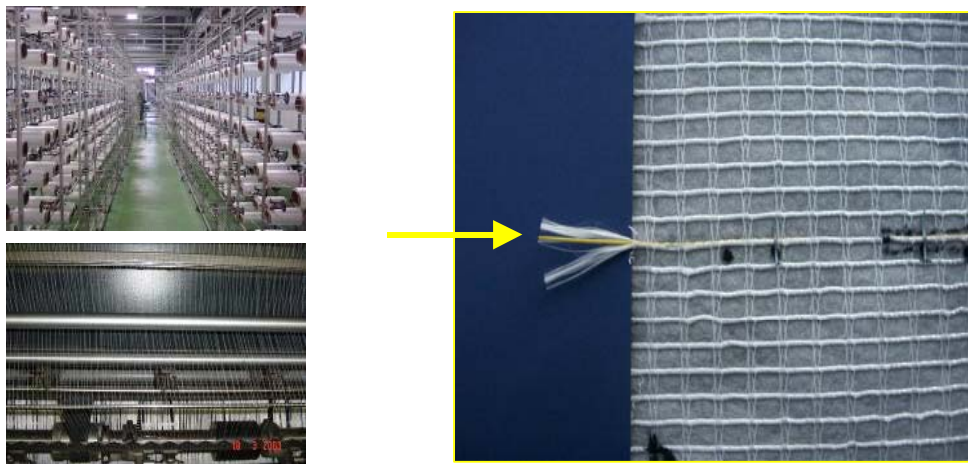


Figure 3. Géotextile instrumenté par fibre optique

### 3. Validation du système : essais et expérimentations

Le système a fait l'objet d'un programme expérimental afin de vérifier la faisabilité de sa fabrication industrielle, de contrôler son endommagement à la mise en œuvre et de valider ses performances de détection et de mesure de déformation. Les essais de production ont permis d'établir un mode d'intégration des fibres optiques à la nappe géotextile générant des déformations tolérables des fibres optiques.

L'ensemble des essais effectués en laboratoire a déjà fait l'objet d'une communication (Briançon et al., 2003). Les principaux résultats sont résumés ci-dessous :

- Les essais de traction ont permis de vérifier que la déformation maximale tolérée par la fibre optique se situait dans la gamme des déformations que subit généralement un géotextile de renforcement dans un ouvrage.

- Des tests d'endommagement à la boîte de cisaillement ont permis de vérifier que le dispositif pouvait subir des charges importantes sans perte de signal, ni détérioration, même en contact avec un matériau agressif.
- Les essais de flexion en membrane pour tester la sensibilité du système indiquent une bonne reproductibilité des mesures enregistrées par les réseaux de Bragg. Les mesures de déflexion et de déformation ont été comparées à des valeurs calculées par un logiciel spécifique en trois dimensions permettant de prendre en considération la nature fibreuse des géosynthétiques.
- Cette analyse met en évidence les limites des essais en laboratoire car ils ne permettent pas d'appliquer des charges représentatives et suffisamment grandes pour conclure avec précision sur les résultats. On note cependant une correspondance entre valeurs mesurées par réseau de Bragg et valeurs calculées.

#### 4. Essais en vraie grandeur au LRPC Nancy

##### 4.1 Description des différentes phases

Pour mieux vérifier les performances du système dans des conditions réelles de chantiers, notamment le comportement pendant l'installation, le compactage du matériau et lors d'un effondrement, une expérimentation a été réalisée au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy. Une première phase a eu lieu en septembre 2002 et a consisté à mettre en place un géotextile équipé de deux fibres optiques distantes de 0,5 m et comportant chacune trente capteurs avec un espacement de 1m et à effectuer plusieurs niveaux de compactage pour évaluer la résistance à l'endommagement. Puis, un effondrement localisé été simulé par le dégonflage de deux ballons installés au préalable sous le géotextile (Briançon et al., 2004).



Figure 4.a : Essais d'endommagement en septembre 2002



Figure 4.b : Essais de chargement en octobre 2003

Une deuxième phase s'est déroulée en mai 2003 et a consisté à enlever les ballons pour mieux visualiser la déformation du géotextile. Enfin une troisième phase s'est déroulée en octobre 2003 et a consisté à charger à l'aide de blocs en béton la couche de grave sur la cavité pour suivre les déformations du géotextile.

Afin de vérifier la pertinence des déformations par les réseaux de Bragg, un système de mesure par fils INVAR et potentiomètres a été mise en place. Quatre câbles rigides et coulissants dans une gaine ont été fixés de part et d'autre des points à mesurer, en l'occurrence les deux capteurs à réseaux de Bragg situés chacun au droit de chaque coussin de levage. Le déplacement des points de fixations permet d'évaluer la déformation par différence.(points P1 à P8)

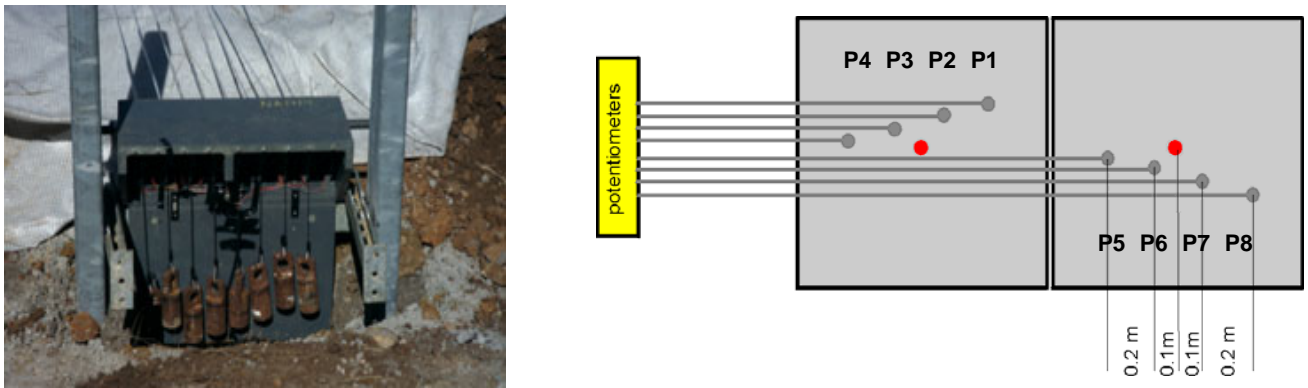


Figure 5. dispositif complémentaire de mesures par fils Invar et potentiomètres

#### 4.2. Résultats des mesures lors de la phase de chargement en octobre 2003

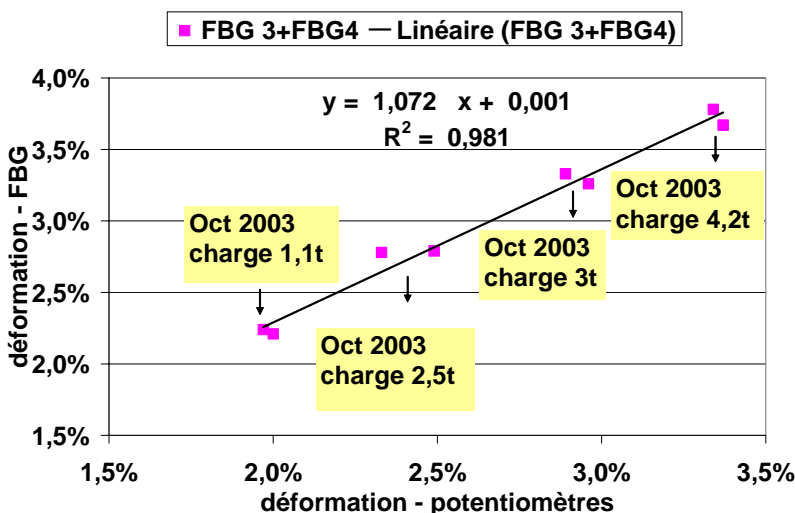
Pour chaque couple de fils, on peut calculer une déformation et la comparer aux mesures effectuées directement par les capteurs à réseaux de Bragg. Le tableau 1 montre les déformations obtenues à chaque étape par l'intermédiaire des potentiomètres.

Tableau 1 – Incréments de déformations pour chaque étape mesurés avec les potentiomètres

|                         | p1-p2 | p2-p3 | p3-p4  | p1-p4 | p5-p6 | p6-p7 | p7-p8 | p5-p8 |
|-------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| dégonflage              | 0,38% | 0,21% | 0,61%  | 0,40% | 1,05% | 0,50% | 1,26% | 0,94% |
| enlèvement des coussins | 1,05% | 0,16% | 0,80%  | 0,67% | 0,36% | 0,84% | 0,62% | 0,61% |
| excavation              | 0,42% | 0,17% | -0,35% | 0,08% | 0,23% | 0,11% | 0,62% | 0,32% |
| chargement 1            | 0,68% | 0,32% | -0,17% | 0,28% | 0,19% | 0,11% | 0,33% | 0,21% |
| chargement 2            | 1,66% | 0,52% | -0,25% | 0,65% | 0,77% | 0,33% | 0,28% | 0,46% |
| chargement 3            | 0,93% | 0,47% | 0,13%  | 0,51% | 0,87% | 0,56% | 0,69% | 0,71% |
| chargement 4            | 0,46% | 0,41% | 0,26%  | 0,37% | 0,49% | 0,45% | 0,52% | 0,49% |
| chargement 5            | 0,54% | 0,39% | 0,52%  | 0,48% | 0,79% | 1,02% | 0,21% | 0,67% |

#### 4.3 Comparaison des mesures optiques et des potentiomètres

La figure 6 montre la corrélation entre les mesures des deux réseaux de Bragg situés au dessus de la cavité et celles réalisées avec potentiomètres pour une base de 60 cm. La correspondance entre les deux systèmes de mesures est très bonne, avec une dispersion faible autour de la courbe moyenne.



Les points du graphique correspondent aux déformations mesurées au niveau des capteurs FBG3 et FBG4, par les capteurs optiques directement et par l'intermédiaire des potentiomètres.

Figure 6. Comparaison des mesures avec potentiomètres et celles avec fibres optiques

Pour chaque étape, les valeurs de déplacements mesurés par les potentiomètres ont été réinitialisées alors que les déformations des réseaux de Bragg sont celles cumulées depuis l'installation. Ceci peut expliquer le décalage à l'origine de la courbe de corrélation.

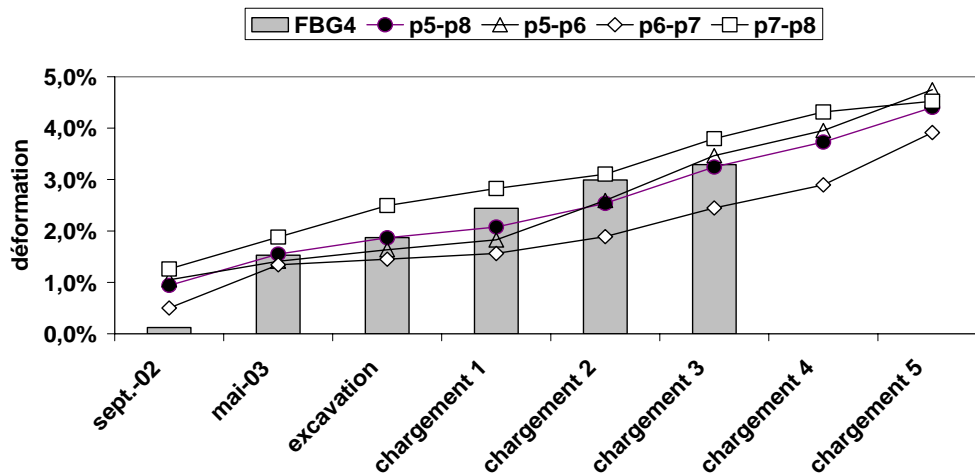


Figure 7. Comparaison des mesures du capteur FBG4 et celles issues des potentiomètres

Sur le graphique 7, sont représentées les déformations calculées entre les points de fixation des fils Invar et celles mesurées par le capteur FBG4 qui ne sont visibles que jusqu'au chargement 3. La courbe p5-p8 correspond aux déformations calculées sur une longueur initiale de 60 cm. Les autres courbes montrent les déformations pour une base de mesures de 20 cm au niveau du réseau de Bragg (courbe p6-p7) ou de part et d'autre (courbes p5-p6 et p7-p8). On note une meilleure correspondance des valeurs du capteur FBG4 avec celles issues des potentiomètres pour une base de mesure de 60cm et une plus forte dispersion entre chaque point espacés de 20 cm.

## 5. Retour d'expériences

### 5.1. Planche expérimentale de Nancy

Après les différentes phases de chargement, le système de mesure optique a été laissé dans le sol sous la couche de matériau granulaire. L'état de la tranchée est présenté figure 8a. Lors de la visite du site en septembre 2005, on a pu constater qu'il était toujours opérationnel après trois années dans le sol.

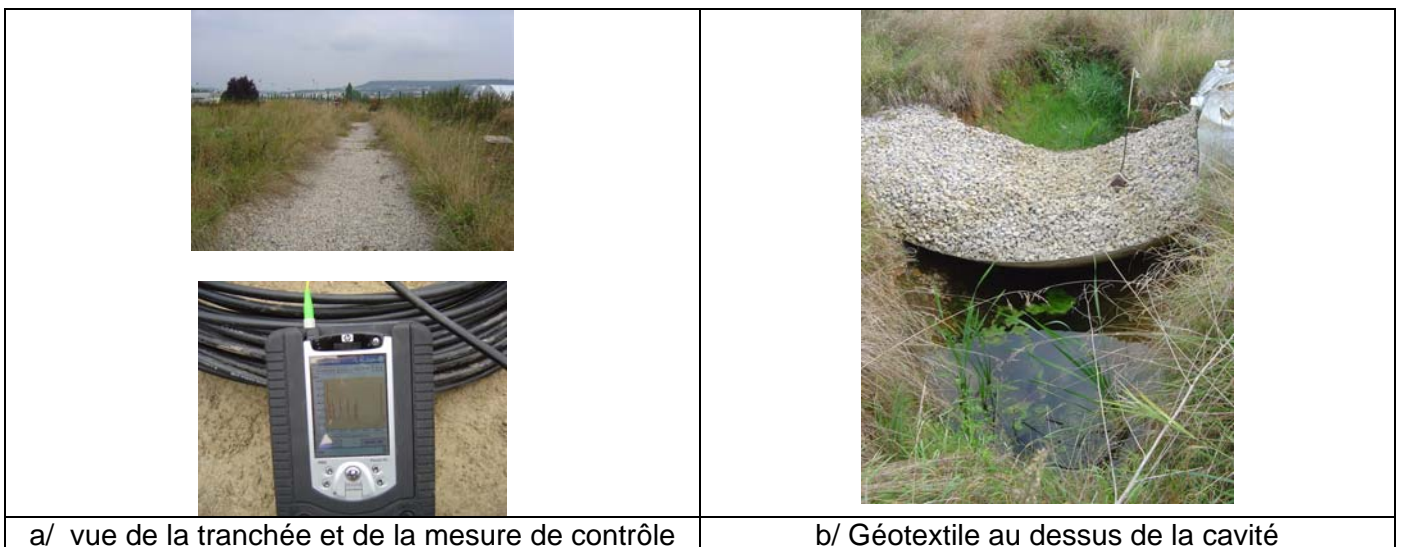


Figure 8.. Contrôles en septembre 2005

Le site du laboratoire de Nancy, sur lequel la planche expérimentale a été réalisée, est proche de la nappe phréatique ce qui implique que le géotextile équipé de fibres optiques soit régulièrement immergé en période pluvieuse. Mais cette présence de l'eau n'a pas détérioré le fonctionnement du système. La figure 8b montre la fosse remplie d'eau où se sont déroulées les phases de chargement.

#### 4.2. Les ouvrages réels instrumentés

Plusieurs ouvrages réels ont été instrumentés avec ce système à fibres optiques, que ce soit en Europe (Autriche et Allemagne), en Asie (Singapour) ou aux Etats-Unis. En France, un géotextile équipé de fibres optiques comprenant 300 capteurs a été installé sous une voie ferrée à Arbois (Nancey et al., 2005) en octobre 2005 pour détecter la remontée de cavités. Cet ouvrage fait l'objet d'une communication à Rencontres 2006 (Briançon et al., 2006). Mais la première application du système de mesure dans un ouvrage réel a été réalisée pour un ouvrage de soutènement à Saint Saturnin. Cet ouvrage, une culée porteuse renforcée par géotextile, fait également l'objet d'une communication à Rencontres 2006 (Rossi, 2006). Il est décrit brièvement ici (figure 9).

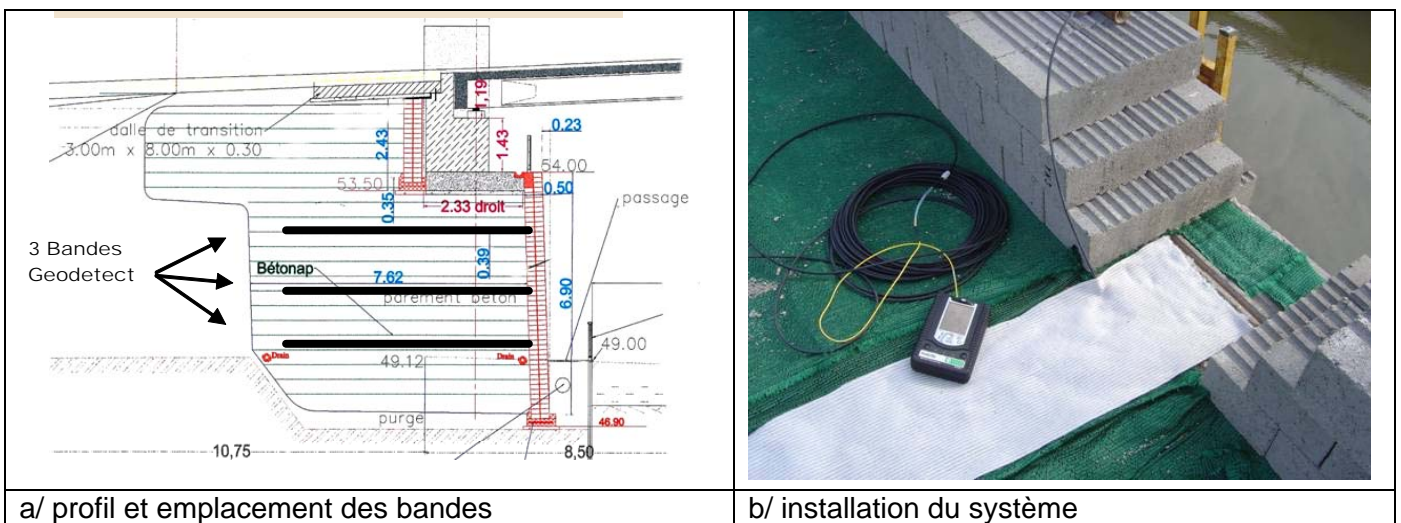


Figure 9.. Ouvrage de Saint-Saturnin

Trois bandes comportant chacune une fibre et huit capteurs à réseaux de Bragg ont été installées dans l'ouvrage pendant la construction du remblai en juillet 2004. Un suivi a été réalisé jusqu'en juin 2005, après la mise en place du tablier. La figure 10 montre l'évolution de la déformation moyenne de la bande n°2 au cours du temps.

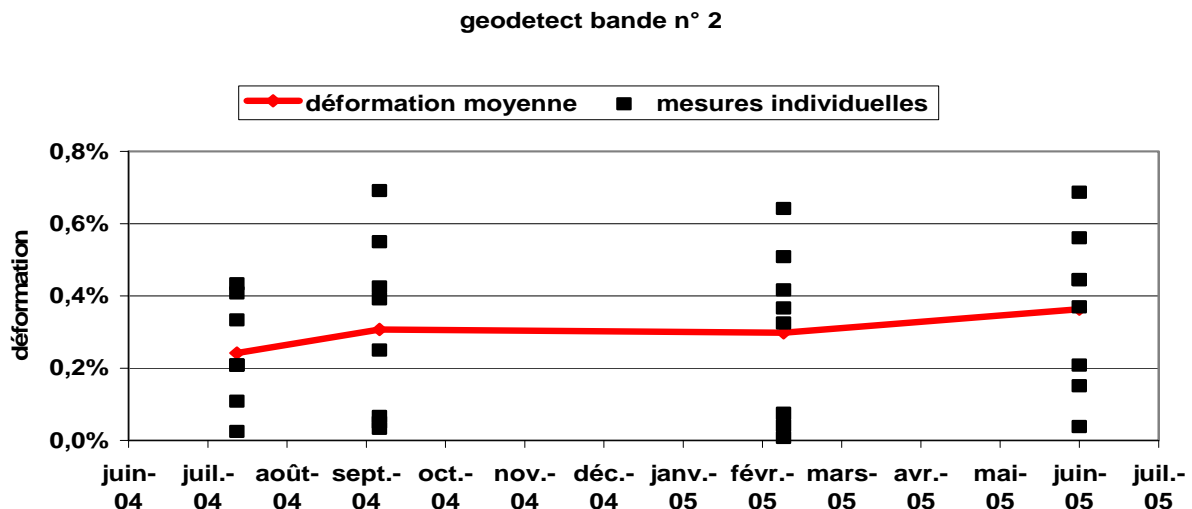


Figure 10.: Evolution des déformations ponctuelles et moyenne entre l'installation et l'achèvement du pont (Saint-Saturnin).

On peut voir que les déformations augmentent légèrement pendant la construction de l'ouvrage entre juillet 2004 et septembre 2004, puis entre février et juin 2005, période durant laquelle la fondation du pont et le tablier ont été posés. Par contre, les déformations restent globalement stables entre septembre 2004 et février 2005, qui est une période sans activité. Il est particulièrement intéressant de noter que les déformations mesurées sont relativement faibles, avec des valeurs maximales inférieures à 0,8%. Elles sont cependant du même ordre que celles enregistrées sur d'autres ouvrages ayant fait l'objet d'une instrumentation (Bathurst, 2002). R.M. Faure (Faure, 2006) présente une analyse plus complète des déformations mesurées.

## 5. Conclusion

Durant les trois années qui se sont écoulées après les premières expérimentations en grandeur réelle, les performances du système Geodetect ont pu être mises en évidence à plusieurs reprises sur des ouvrages réels. Cet outil rapide et facile à mettre en œuvre permet à la fois de visualiser le comportement d'un ouvrage et de suivre ses déformations dans le temps. On a pu voir que les valeurs de déformations mesurées par cette technologie optique étaient comparables à celles obtenues à partir de système plus courants.

Le fait de disposer d'un système de mesure opérationnel plus d'un an après sa mise en place sur des ouvrages réels et de plus de trois pour un ouvrage expérimental montre aussi que la durabilité constatée de cette technique va bien au delà de celle des capteurs traditionnels généralement limitée à quelques mois, sachant que dans le sol, la durée de vie des fibres, avec une protection adéquate, peut être estimée à 20 ou 30 ans.

## 6. Références bibliographiques

- Bathurst, R.J., Allen, M.T., Walters, D.L. (2002) Short term Strain and Deformation Behavior of Geosynthetic Walls at working stress conditions. *Geosynthetics International*, vol 9., Nos 5-6, pp. 451-482.
- Briançon, L., Nancey, A., Caquel, F. and Villard, P. (2004) New technology for strain measurements in soil and the survey of reinforced earth constructions. *Proc, EUROGEO 3, March 01-03 2004, Munich, Germany*, pp. 471-476.
- 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, Juin 2006 Montpellier*.
- Faure, R.M., Auray, G. (2006) Exploitation des mesures de déplacement faites sur la culée expérimentale de Saint Saturnin.. *Rencontres Géosynthétiques 2006, Juin 2006 Montpellier*.
- Nancey, A., Briançon, L., and Villard, P. (2004). Geodetect: The first "intelligent" geosynthetic for the measurements of strain in soil and the survey of reinforced earth construction, *Proc., Railway Engineering - 2004, July 6- 2004, London, UK.*
- Nancey, A., Voet, M. and Vlekken, J. (2005) Geodetect: a new step for the use of fiber optic Bragg Grating technology in soil engineering. *Proc., 17<sup>th</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors, Bruges, Belgium, 2005 May 23-27, pp. 214-217.*
- Rossi, D., Faure, R.M., Ducol, J.P., Nancey (2006) A. Culée de pont porteuse réalisée avec un mur fait de blocs aspect pierre éclatée et renforcé par des géotextiles. *Rencontres Géosynthétiques 2006, Juin 2006 Montpellier*.