

MISE EN ŒUVRE D'UN SYSTÈME D'ALERTE INTÉGRÉ À UNE NAPPE GÉOSYNTHÉTIQUE DE RENFORCEMENT D'UNE VOIE FERRÉE

SET UP OF A WARNING SYSTEM INTEGRATED INSIDE A REINFORCED GEOTEXTILE FOR THE SURVEY OF RAILWAY

Laurent BRIANÇON¹, Alain NANCEY², Alain ROBINET³

¹ Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France

² Bidim Geosynthetics

³ SNCF

RÉSUMÉ – A la suite de la localisation d'une faille perpendiculaire à une voie ferrée pouvant générer des effondrements localisés circulaires, la SNCF a décidé de renforcer la zone par un géosynthétique de renforcement. Un dispositif d'alerte intégré à la nappe géosynthétique a été mis en œuvre à l'occasion de ce chantier. Ce dispositif est constitué d'un réseau de capteurs optiques sensibles à la déformation de la nappe géosynthétique. Le maillage du réseau de capteurs optiques a été dimensionné pour assurer la détection d'une cavité par au moins un capteur en optimisant le réseau. Le retrait de la superstructure, la mise en œuvre de la nappe géosynthétique instrumentée et la remise en service de la ligne ont été effectuées sans générer de perturbations importantes du trafic.

Mots-clés : système d'alerte, géosynthétique de renforcement, instrumentation, voies ferrées dimensionnement.

ABSTRACT – After the detection of a fault perpendicular to a railway and to avoid any risk that a train circulates on a collapsed area, the French railway service decided to reinforce the structure by geosynthetics that was considered as the best solution to avoid a long interruption of the traffic. Additionally, it was decided to install a warning system that combines reinforcement and strain measurement by optical sensors, in order to check his behaviour on real site condition. The optical sensors network was designed to optimize the number of sensors and to ensure the detection by a minimum of one sensor. To not disturb the traffic of the trains in the daytime, geosynthetic was laid during the night.

Keywords: warning system, reinforced geosynthetic, monitoring, railway, design.

1. Introduction

Le suivi instrumental d'ouvrages géotechniques est nécessaire pour assurer leur surveillance lorsque les ouvrages sont soumis à des conditions susceptibles de varier au cours du temps. C'est le cas de voies ferrées mises en œuvres dans des zones où il existe un risque d'effondrements localisés.

A la suite de la détection d'une faille perpendiculaire à une voie ferrée dans la région de Dijon, la SNCF a décidé de renforcer la zone avec une nappe géosynthétique de renforcement pour prévenir tout effondrement et limiter les tassements en surface. Comparativement aux solutions traditionnelles comme la mise en œuvre d'un radier béton, la solution d'un géosynthétique de renforcement paraissait comme la plus économique en considérant les contraintes d'un tel chantier et notamment le temps d'interruption du trafic. RFF et la SNCF ont décidé d'adjoindre au dispositif de renforcement un dispositif d'alerte assurant la détection d'effondrements localisés pour éviter tout risque de circulation de train sur une déformation de voie liée à l'apparition d'une cavité. Ce dispositif d'alerte, résultat d'un programme de recherche appelé « Geodetect », a obtenu le label Eureka (Σ! 2579/F958) en 2001 ; il combine un réseau de capteurs optiques à une nappe géosynthétique de renforcement.

Le dimensionnement du renforcement et du dispositif d'alerte ainsi que la mise en œuvre de la nappe géosynthétique sont présentées dans cette communication.

2. La zone à renforcer

A la suite de la détection d'une faille perpendiculaire à une voie ferrée située entre les kilomètres 398+195 et 398+245 de la ligne Mouchard Bourg, la SNCF a évalué un risque d'effondrements localisés de diamètre 1,2m à 1,5m. Deux rails ont été ajoutés pour renforcer temporairement la zone à risque

(Figure 1a). Cette zone concerne une portion de 50m d'une voie simple (5m de large). La plate-forme sous les rails est constituée de 25cm de ballast et 50cm de remblai (Figure 1b).

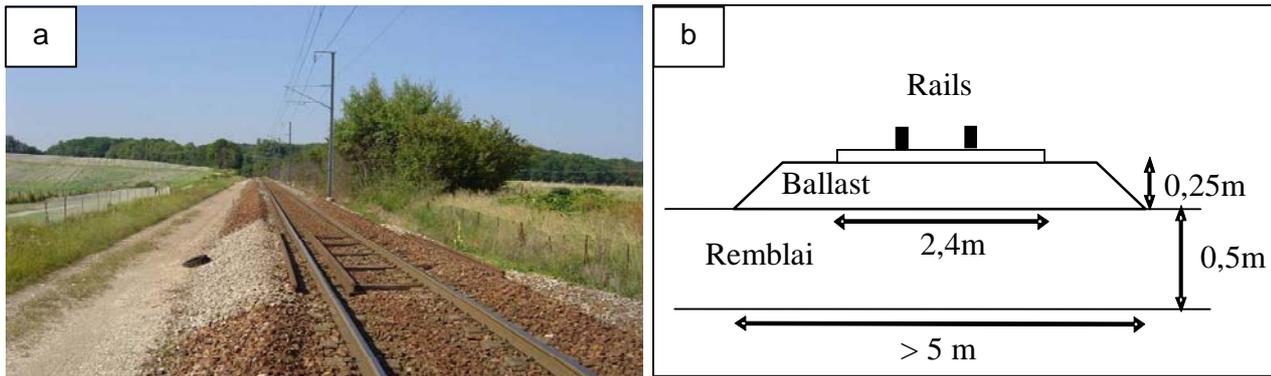


Figure 1. Zone à renforcer

3. Dimensionnement du renforcement

3.1. Dimensionnement de la nappe à court terme

Le géosynthétique a été dimensionné à partir de la méthode analytique développée au cours du projet RAFAEL (Villard et al, 2000), mené pour étudier le comportement des géosynthétiques sur cavités. Les mécanismes de rupture observés lors des expérimentations en vraie grandeur menées dans le cadre du projet RAFAEL (rupture verticale et le foisonnement du sol) ont été pris en compte dans les hypothèses de calcul. Les paramètres de dimensionnement considérés sont :

- un coefficient de foisonnement du sol de la couche de remblai $C_{ce} = 1,1$,
- une contrainte due au poids propre de la superstructure $q_0 = 6 \text{ kPa}$,
- un poids de 225 kN par axe distribué sur trois traverses,
- une cavité de diamètre variant entre 1,2 m et 1,5 m.

Avec de tels paramètres, la contrainte maximum appliquée sur la nappe géosynthétique est égale $q_{\max} = 45 \text{ kPa}$; elle correspond au cas d'une cavité située sous un rail lors du passage d'un train.

Les critères de dimensionnement sont basés sur les tolérances géométriques de gauche mesuré sur 3 mètres établis par la SNCF, à savoir :

- critère d'alerte pour un tassement en surface $s_A = 0,006 \text{ m}$,
- critère de ralentissement pour un tassement en surface $s_R = 0,009 \text{ m}$,
- critère d'intervention pour un tassement en surface $s_I = 0,021 \text{ m}$.

Le géosynthétique choisi est un non tissé aiguilleté renforcé par des câbles en polyester dans le sens production : il s'agit d'un Bidim Rock Pec 300 ayant une raideur $J = 3400 \text{ kN/m}$ à 2% de déformation. La raideur de la nappe a été dimensionnée pour respecter le critère d'intervention ; cependant le système d'alerte permet de détecter une déformation de la nappe correspondant au critère d'alerte.

Dès qu'une cavité apparaît, il est nécessaire d'intervenir pour assurer la stabilité à long terme. Le renforcement par géosynthétique est une solution temporaire, le diamètre de la cavité peut en effet augmenter avec le temps et atteindre une valeur non prise en compte dans les hypothèses de dimensionnement. Pour des structures épaisses, le foisonnement du sol entraîne un tassement en surface inférieur au tassement observé au niveau de la nappe géosynthétique ; pour des structures de faibles épaisseurs, comme dans le cas présent, le tassement en surface n'est pas significativement affecté par le foisonnement du sol et un dispositif d'alerte est requis pour assurer une intervention rapide.

3.2. Dimensionnement de la nappe à moyen terme

Le dimensionnement de la nappe géosynthétique a été fait à court terme en respectant les critères de surface mais cette nappe doit aussi assurer la stabilité de la superstructure après l'apparition d'un effondrement localisé, le temps de la réparation. Pour ce calcul on prévoit une majoration des charges statiques de 10% et on prend en compte une charge roulante de $Q_r = 25 \text{ T}$. Dans le cas le plus critique

(cavité sous rail), le critère de tassement en surface est respecté pour la raideur réelle du géosynthétique.

3.3. Dimensionnement des ancrages

L'ancrage linéaire de la nappe géosynthétique est assuré dans le sens longitudinal, la longueur de voie à traiter étant inférieure à la longueur de la nappe géosynthétique, il n'y a pas de zone de recouvrement de la nappe ; la zone d'ancrage se situe donc de part et d'autre de la zone à traiter. Cet ancrage est calculé en considérant le frottement à l'interface sol / géosynthétique dans le cas le plus défavorable, c'est à dire à moyen terme et pour une cavité située à la verticale des rails et à la frontière de la zone à traiter. Avec de telles conditions, les longueurs d'ancrages calculées sont $L_a = 6$ m.

4. Le système d'alerte

Le système d'alerte est constitué de capteurs optiques répartis sur des fibres optiques intégrées à la nappe géotextile de renforcement. Ce dispositif présente l'intérêt d'allier à la fois l'aspect renforcement et l'aspect détection.

4.1. Les capteurs optiques du système d'alerte

L'utilisation de fibres optiques en instrumentation s'est développée dans les années 80. Plusieurs techniques de mesures existent. La technique choisie pour le nouveau dispositif d'alerte est celle des fibres optiques à réseaux de Bragg (Nancey et al. 2005)

Un réseau de Bragg est constitué par une variation périodique de l'indice de réfraction inscrite le long du cœur d'une fibre optique. Un réseau de Bragg est identifié par sa longueur d'onde λ . Les effets de l'inscription d'un réseau de Bragg le long d'une fibre optique sont de réfléchir une longueur d'onde prédéterminée du faisceau lumineux tout en se laissant traverser par les autres longueurs d'onde. La longueur d'onde réfléchie satisfait les conditions de Bragg faisant intervenir des paramètres sensibles aux variations de température et de déformation auxquelles est soumise la fibre optique. Ainsi en imposant un faisceau lumineux le long d'une fibre optique sur laquelle des réseaux de Bragg ont été inscrits, il est possible de mesurer les variations de déformation et de température du milieu environnant la fibre optique.

4.2. Le système Geodetect

Les fibres optiques sont assemblées avec la nappe géotextile dans la phase d'intégration des câbles de renfort (Figure 2). 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 (Nancey et al. 2004).

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, à l'environnement électromagnétique et aux radiations, il n'entraîne pas d'interférences électromagnétiques et ne peut pas provoquer d'explosions (pas d'étincelle).

Ce 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 (Briançon et al, 2004).

La détection d'effondrements localisés par la mesure de la déformation de la nappe géosynthétique est pertinente puisque la déformation de la nappe, négligeable lors de sa mise en œuvre, devient significativement lorsque qu'une cavité apparaît ; en effet la mobilisation de la tension dans la nappe requise pour supporter la charge au-dessus de la cavité nécessite une déformation importante et prédéterminée.

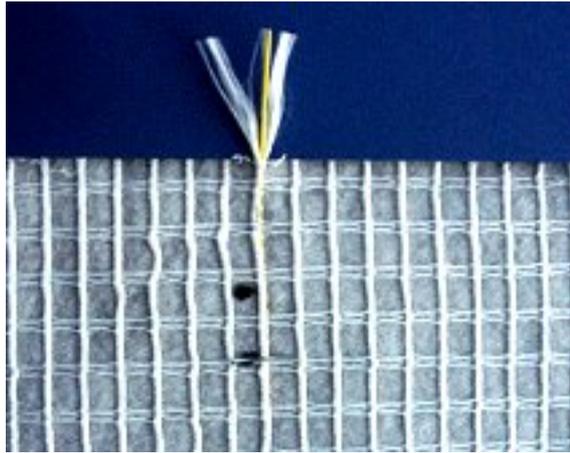


Figure 2. Fibre optique insérée dans la nappe géotextile

4.3. Dimensionnement du réseau de capteurs optiques

Le réseau de capteurs optiques a été dimensionné pour optimiser le nombre de capteurs tout en assurant une détection de cavité par au moins un capteur : 5 fibres optiques espacées de 0,85m constituent le maillage avec des capteurs optiques positionnés tous les 0,85m sur chaque fibre. Ce système est donc constitué de 297 capteurs optiques disposés en quinconce (Figure 3).

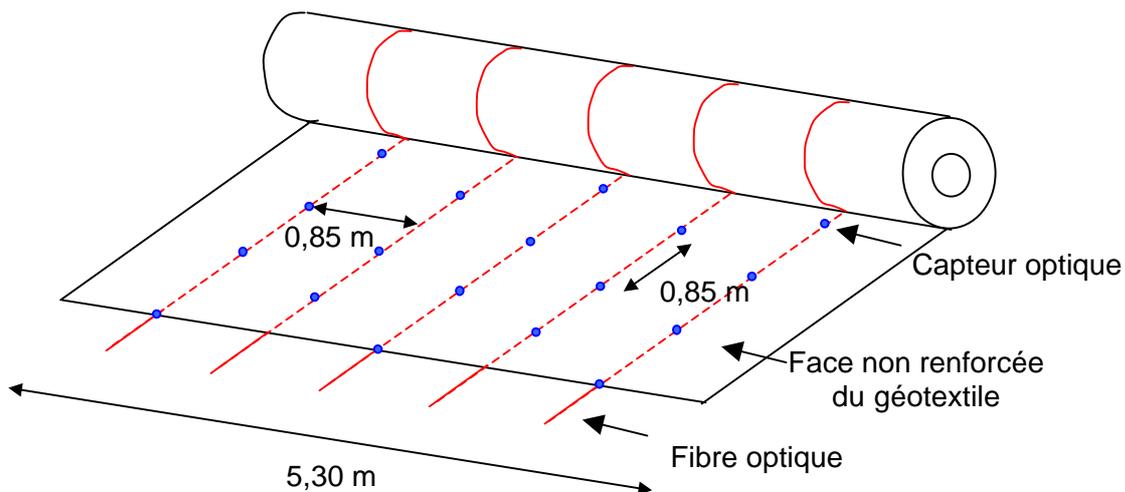


Figure 3. Distribution des capteurs optiques sur la nappe géosynthétique

Un maillage triangulaire a été préféré à un maillage rectangulaire car il assure une meilleure couverture de détection (Tableau 1). En effet, avec un maillage triangulaire 80% des cavités sont détectables pas au moins deux capteurs optiques alors que seulement 72% des cavités le sont dans le cas d'un maillage rectangulaire.

Tableau 1. Surface pour laquelle une cavité est détectable par 1, 2 ou 3 capteurs optiques

	Détectable par 1 capteur	Détectable par 2 capteurs	Détectable par 3 capteurs
Maillage rectangulaire	100 %	72 %	0 %
Maillage triangulaire	100 %	80 %	9 %

Pour déterminer la zone de l'effondrement localisé, chaque fibre comporte trois séries de 20 réseaux de Bragg répondant à trois longueurs d'onde distinctes. Cette configuration permet de situer une cavité dans une zone de 16,7 m de long. Les séries de réseaux de Bragg seront décalées de 8,3m d'une fibre à l'autre afin d'affiner la localisation dans le cas où une cavité est détectée par deux capteurs de deux fibres successives (Nancey et al., 2004).

4.4. Préparation des nappes instrumentées

La nappe géotextile a été connectée sur son lieu de production (Figure 4a). La connexion en elle-même n'a pas posé de problème, par contre il a été nécessaire d'adapter les dispositifs existants (dérouleuse - enrouleuse) pour adapter le rouleau et pouvoir le dérouler complètement afin de connecter la nappe des deux côtés. La connexion finale, reliant les fibres optiques au système d'exploitation a été réalisée sur le site expérimental. Le rouleau a été spécialement enveloppé pour éviter tout endommagement lors du transport (Figure 4b).



Figure 4. Préparation et conditionnement de la nappe géotextile

5. Mise en œuvre du dispositif

5.1. Contraintes du chantier

Différentes contraintes spécifiques aux chantiers ferroviaires étaient imposées:

- une interruption du trafic de courte durée,
- une progression de l'intervention non ralentie par la mise en œuvre de la nappe,
- un nombre d'engins important dans un espace réduit,
- un chantier nocturne.

5.2. Mise en œuvre de la nappe géosynthétique

Le renforcement de la structure a été effectué dans la nuit du 18 au 19 octobre 2004 pour ne pas perturber le trafic en journée. La circulation a été interrompue en 23h00 à 6h00. L'installation du géotextile s'est insérée dans le processus de réfection de la voie avec les étapes successives suivantes :

- dépose des panneaux de voie de 8m,
- retrait du ballast,
- terrassement à une profondeur de 50 cm,
- pose du géotextile instrumenté (Figure 5),
- remblaiement en 0/31,5 avec compactage par couches de 25cm,
- mise en oeuvre de la couche de ballast,
- repose de la voie,
- ballastage,
- bourrage,
- dégagement BML.



Figure 5. Mise en œuvre de la nappe géosynthétique

La mise en œuvre de la nappe s'est déroulée dans de vraies conditions de chantier (intempéries, espace de travail limité, circulation d'engins...); cependant, grâce à la préparation de la nappe en usine, son installation n'a pas retardé la progression du chantier.

5.3. Installation du dispositif instrumental

Un box étanche a été spécialement construit pour assurer une protection des appareils de mesures vis-à-vis d'actes de vandalisme et des conditions météorologiques. Ce box (Figure 6a) a été construit à proximité de la zone renforcée (Figure 6b) en août 2005 permettant d'installer le dispositif nécessaire à une surveillance en continu de la zone ; il est constitué :

- d'une armoire avec air conditionné,
- d'un PC industriel avec modem,
- d'un Spectromètre avec multiplexeur 8 voies.

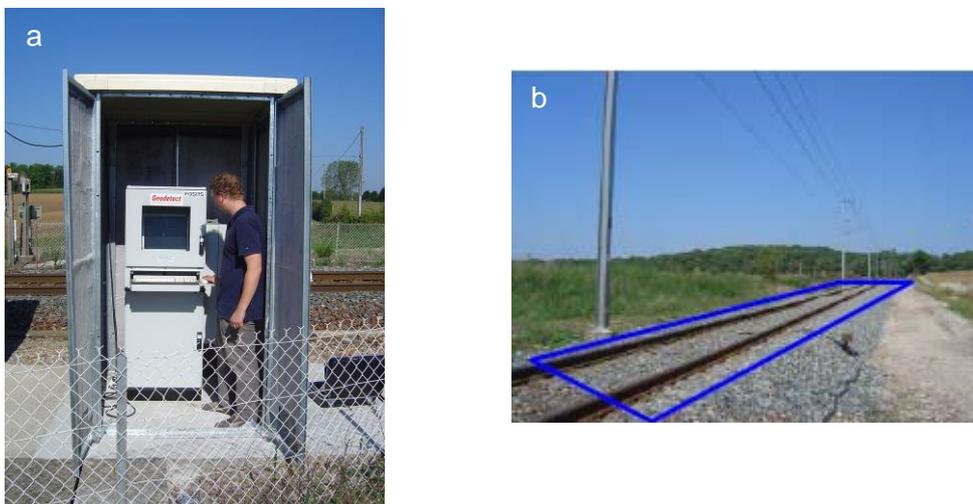


Figure 6. Installation du dispositif de surveillance

Un logiciel a été spécialement développé pour suivre les mesures de déformation en tenant compte des paramètres d'alerte définis préalablement. L'écran de contrôle (Figure 7) permet de visualiser l'état des lignes. Dans la partie haute et à droite de l'écran, est affiché le spectre d'une des 5 lignes en temps réel. Les spectres des autres lignes sont ensuite affichés successivement à une fréquence définie et modifiable. Trois zones de longueurs d'ondes ont été définies et chaque début de zone est matérialisé par un trait de couleur. La partie gauche montre l'évolution des longueurs d'onde en fonction du temps dans une plage donnée qui peut être paramétrée. Dans la partie basse de l'écran à droite, sont inscrits les déformations maximales enregistrées dans chaque zone et pour toutes les lignes connectées. Sur la

gauche, ces déformations sont également représentées sur le schéma représentant les lignes optiques sur le rouleau.

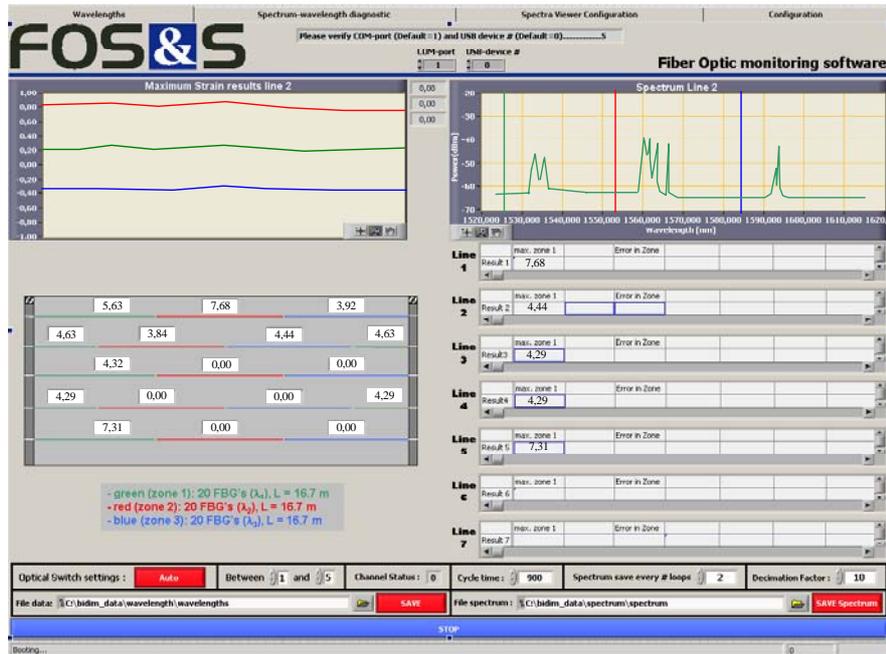


Figure 7. Ecran de contrôle du dispositif de surveillance

Le dispositif est équipé d'un modem permettant le suivi de l'installation par les responsables SNCF en charge de la maintenance.

6. Conclusions

Un dispositif d'alerte par fibres optiques à réseaux de Bragg insérées dans une nappe géotextile a été mis en œuvre sous une portion de voie ferrée où un risque d'apparition potentielle de karst a été identifié. L'installation de la nappe dans des conditions de chantier a confirmé la nécessité de la préparation préalable du rouleau ; en particulier, la réalisation des connexions optiques. Le dispositif de surveillance associé a par la suite été installé. Des premières mesures permettront de déterminer la déformation de service et de paramétrer le dispositif d'alerte.

7. Références bibliographiques

- Briançon L., Nancey A., Caquel F., 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.*
- Nancey A., Briançon L., 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., Vlekken J. (2005). Geodetect: a new step for the use of fiber optic Bragg Grating technology in soil engineering. *Proc., 17th International Conference on Optical Fiber Sensors, Bruges, Belgium, 2005 May 23-27, pp. 214-217.*
- Villard P., Gourc J.P., Giraud H. (2000). A geosynthetic reinforcement solution to prevent the formation of localized sinkholes. *Canadian Geotechnical Journal, 37, n°5, pp. 987-999.*