

Une candidature au "Solscope Prix du produit de l'année"

Le fTB 5020 de fibrisTerre Systems GmbH



Figure 1 : le fTB 5020 de fibrisTerre Systems GmbH

L'entreprise -Qui est fibrisTerre?

En 2010, une équipe de spécialistes de l'électronique, de la fibre optique et de l'ingénierie informatique possédant une vaste expérience dans le domaine de la surveillance de l'état des structures a uni ses forces pour fournir une solution précise et fiable pour la surveillance des infrastructures dans les secteurs de l'énergie, du transport, de la construction et des ouvrages géotechniques en générale.

Sous le nom de fibrisTerre Systems GmbH, ils étaient les pionniers de l'analyse optique de fréquence Brillouin (BOFDA) basée sur la détection distribuée par fibre optique, une technologie issue de la recherche au BAM, l'institut allemand en matière de recherche et d'essai des matériaux.

L'entreprise compte aujourd'hui dix employés et nous nous sommes engagés à fournir des produits et des services de haute qualité pour répondre aux besoins de nos clients.

Le siège social, la R&D et la production de l'entreprise sont basés à Berlin, en Allemagne. Les bureaux de fibrisTerre se trouvent à la Torellstrasse, qui porte le nom d'Otto Martin Torell, célèbre géologue suédois du XIXe siècle. C'est approprié, non ?

Le progrès technologique

La détection par fibre optique est largement utilisée depuis la fin des années 1980 pour surveiller la température le long de structures linéaires, le plus souvent pour la détection d'incendies dans les tunnels et pour la détection de points chauds le long des câbles électriques. fibrisTerre a développé une technologie de pointe basée sur le monitoring par fibre optique capable de fournir une surveillance spatialement continue, en temps réel destinée au marché géotechnique.

Le système est basé sur la diffusion Brillouin le long d'une fibre optique (le capteur). Cette diffusion était observée et nommée d'après Léon Brillouin (1889-1969), un physicien franco-américain, qui a notamment travaillé sur la théorie des ondes et la théorie de l'information (https://fr.wikipedia.org/wiki/Léon_Brillouin). Les contraintes mécaniques et la température influencent la réponse non-linéaire du matériau. L'analyse des signaux optiques se propageant le long de la fibre optique permet d'obtenir des informations détaillées sur la distribution spatiale de contraintes mécaniques le long de la structure instrumentée avec les capteurs optiques .

Le marché

fibrisTerre a développé la technologie de mesure BOFDA pour répondre au développement du marché de la surveillance de l'état des structures. Elle est idéale pour les structures étendues et complexes, capable de détecter en continu les distributions spatiales de température et de contrainte mécanique.

Traditionnellement, l'utilisation de capteurs ponctuels permet de détecter des événements qui se produisent à proximité de la position des capteurs même, fournissant des données sur une zone limitée. Ils sont idéaux pour surveiller une zone prédéfinie, où un risque plus élevé de déformation du sol a peut-être été identifié. Ils nécessitent souvent une installation, un étalonnage et une maintenance individuels, de sorte que s'ils sont bénéfiques et rentables sur de petites zones, tandis que rarement rentables sur de grandes zones.

Les capteurs quasi distribués, y compris les capteurs sans fil, peuvent couvrir une zone plus étendue, nécessitant eux aussi généralement une installation et une maintenance individuelles et fournissant des données à partir d'une zone limitée, bien que plus étendue que les capteurs ponctuels.

Les capteurs distribués à fibre optique couvrent de longues distances et peuvent être intégrés ou enterrés avec continuité dans une structure ou fixés en surface pour fournir des données de mesure rentables à long terme dans des zones éloignées et difficiles d'accès. Le capteur distribué à fibre optique est intrinsèquement inerte, ne nécessite d'aucune maintenance et n'a pas besoin d'être alimenté en électricité. L'unité d'acquisition de données peut être placée à proximité dans un boîtier protégé, ou à distance utilisant une liaison de transfert de données par fibre optique. Le capteur à fibre optique peut être interrogé continuellement en fonctionnement autonome ou, par exemple, selon les besoins spécifiques du projet, à intervalles mensuels lors de visites sur le terrain.

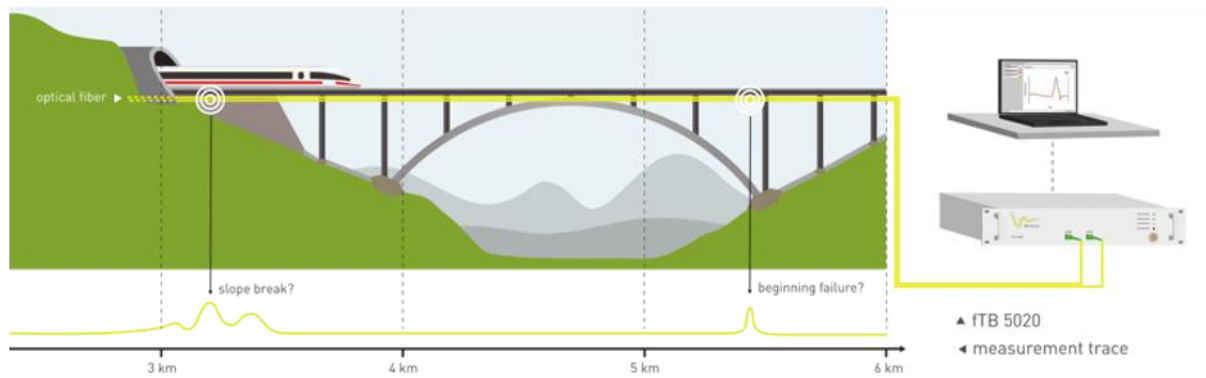


Figure 2 : Détection distribuée de la déformation et de la température sur la base d'un câble à fibre optique. Le système peut détecter un début de mouvement du sol sur le talus ou une déformation du rail, par exemple.

Le résumé suivant a été rédigé par le CIRIA (Association de recherche et d'information sur l'industrie de la construction) dans une publication en 2020. et montre les avantages de la surveillance continue par rapport à la norme industrielle qui est, dans de nombreux cas, l'inspection visuelle.

| Type générique de SHM | Inspection visuelle | Contrôle périodique sur la base de visites | Surveillance continue de l'état des structures à l'aide de capteurs |
|--------------------------------------|---|--|---|
| Les données | Données physiques visibles | Données physiques mesurables | Données physiques mesurables |
| Accès requis | Inspection sur place | Inspection sur place | Non requis |
| Équipement | l'œil et le toucher humains, appareil photo | Équipement de mesure portable | Capteurs fixés/connectés de manière permanente au bien |
| Fréquence de la collecte des données | Minimale. Généralement tous les deux ans | Minimale | Très fréquente |
| Principaux types d'informations | Qualitative | Quantitatives | Quantitatives |
| Application | L'état | État et comportement | État et comportement |

Figure 3 : Formes génériques de surveillance de l'état des structures (tableau traduit de 'Structural health monitoring in civil engineering' P. Sparkes and J. Webb, CIRIA <https://www.ciria.org/ItemDetail?iProductcode=C788&Category=BOOK>)

fibrisTerre opère sur un marché mondial, collaborant avec des spécialistes de la surveillance de l'état des structures, de la géotechnique et de la géodésie. Elle compte parmi ses clients des universités, des ingénieurs civils et des ingénieurs-conseils, des entreprises de services publics et des opérateurs ferroviaires nationaux.

Description du produit

Le système de mesure de fibrisTerre, basé sur l'analyse Brillouin dans le domaine des fréquences optiques (BOFDA), comprend une unité d'interrogation propriétaire, le fTB 5020 (Figure 4) et des câbles de détection à fibre optique capables de détecter et de localiser des déformations avec une grande précision, en continu et en temps réel. Il existe de nombreux types de câbles de détection pour garantir que les données obtenues correspondent aux besoins du projet. De plus, une fois installés, les câbles de détection ne nécessitent aucun entretien.



Figure 4 : fTB 5020 de fibrisTerre

Performances :

Configuration boucle (BOFDA)

| | |
|---------------------|-----------------|
| Résolution spatiale | < 0.2 m |
| Plage de mesure | > 50 km |
| Répétabilité | < 0.1°C, 2 µm/m |

Configuration à une seule extrémité (BOFDR)

| | |
|---------------------|----------------|
| Résolution spatiale | 1.5 m |
| Plage de mesure | > 25 km |
| Répétabilité | < 1°C, 20 µm/m |

Comme les utilisateurs peuvent souhaiter utiliser l'instrument pour acquérir des mesures sur différents sites, le facteur de forme et la consommation d'énergie sont importants pour eux. L'unité fibrisTerre pèse moins de 7 kg, avec une hauteur de 2 unités de rack et consomme environ 30 W.

La faible consommation de puissance électrique permet aussi de réaliser l'instrument sans besoin d'ouvertures dans le boîtier, ni de ventilateurs. Ceci confère une grande fiabilité de l'instrument particulièrement importante en environnement difficile sur le chantier (construction de tunnel, secteur minier).

Une caractéristique utile du système est que la dimension des fichiers de mesure produits est relativement contenue, avec une de volumes de données d'environ 50 GB par an, en mesurant en continu un canal de 10 km, une fois par heure. Différents format de boîtiers sont disponibles et l'instrument peut être monté dans un rack standard ou transporté aisément en configuration « stand-alone ».

Pour les projets nécessitant de nombreuses boucles de mesure, par exemple les pieux et les talus, fibrisTerre offre une famille de multiplexeurs optiques propriétaires pour mesurer plusieurs canaux.

Les avantages de la détection par fibre optique sont les suivants :

- Le système fibrisTerre détecte et localise de petits événements, observant des changements de température d'environ 1°C et des déformations inférieures à 20 µε sur des distances de dizaines de kilomètres, en continu et en temps réel.
- Plus la distance et l'étendue de la zone de mesure sont importantes, plus la surveillance est économiquement avantageuse, comparé à des méthodes traditionnelles de mesure ponctuelle.

- Les câbles de détection, insensibles aux interférences électromagnétiques (EMI), sont idéals pour installation le long de lignes de transport électrifiées.

Les pieux et les revêtements de tunnels font partie des éléments structurels couramment surveillés à l'aide de la détection par fibre optique distribuée de fibrisTerre dans les domaines du génie civil et de la géotechnique. Cette technique permet, entre autres, de surveiller en permanence la convergence de tunnels, l'érosion, l'affaissement et d'autres mouvements du sol, ainsi que les changements de température. Par exemple, la température peut être mesurée pendant la phase de prise du béton, ce qui permet d'obtenir des températures de durcissement réelles, à l'intérieur de la structure, plutôt qu'estimées.

En 2022, en réponse à la demande de ses clients, fibrisTerre a lancé fTScope, une plateforme de gestion des données basée sur l'informatique en ligne pour le partage des données entre les utilisateurs et permettant l'accès aux instruments à distance.

Aspect innovant et valeur ajoutée

Une brève description de l'utilisation du produit dans le cadre d'un grand projet en Autriche montre la valeur ajoutée du système fTB 5020. (NB. Cette étude de cas a été soumise pour publication dans le SOLSCOPE MAG, pour juin 2023).

Suivi de la déformation des revêtements en béton projeté dans le tunnel de base du Semmering.

Des câbles de détection à fibre optique ont été incorporés pendant la construction du tunnel, permettant la détection et la localisation à distance et en continu des événements de déformation et de température. Sensibles aux petites variations, mais suffisamment robustes pour résister à la pression et aux vibrations, ces capteurs sont idéaux pour l'environnement difficile de la construction des tunnels.



Figure 5 : Application de béton projeté. © IGMS, TU Graz

Surveillance continue, modèles et détection de forme (shape sensing)

Outre la surveillance pendant la construction, le système DFOS fournit des données permettant de valider les modèles de construction. Un logiciel propriétaire a fourni des profils

de convergence, permettant de comparer le modèle de pré construction avec les données réelles.

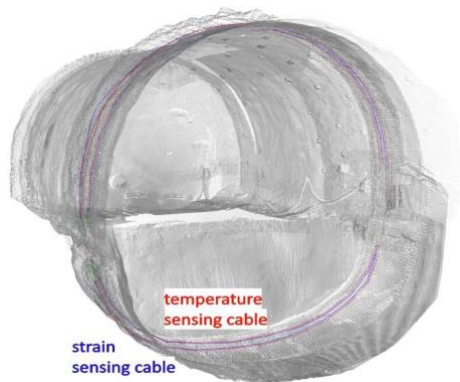


Figure 6 : Position des câbles de détection dans la section du tunnel, capturée par la technique de balayage laser. © IGMS, TU Graz

Les résultats des mesures et ce qu'ils indiquent au constructeur

Les profils de déformation (Image 7 b), ont montré une stabilisation de la déformation après 4 jours de l'excavation de la voûte. Ensuite, comme prévu, une nouvelle accélération de la déformation est enregistrée lors de l'excavation de la banquette et du radier. Ces données ont confirmé que les matériaux et les techniques utilisés étaient appropriés pour ce tronçon de tunnel et que la construction pouvait se poursuivre en toute sécurité.

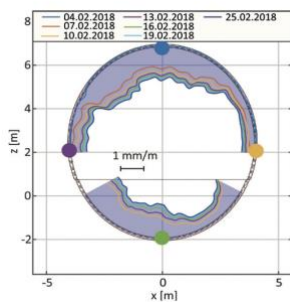


Figure 7a : Distribution des déformations dans la couche extérieure de béton projeté le long de la section transversale du tunnel
© IGMS, TU Graz

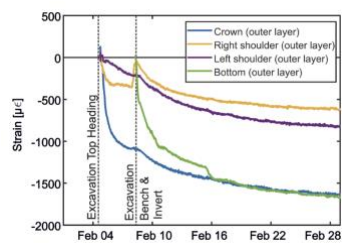


Figure 7b : Évolution de la déformation dans la couche extérieure de béton projeté

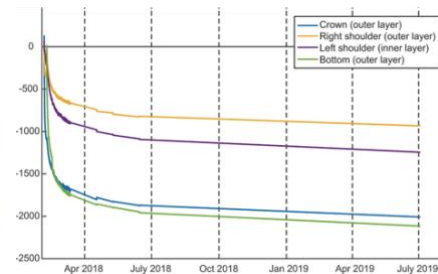


Figure 7c : Progression de la déformation à long terme du revêtement du tunnel

Les mesures DFOS étaient en accord avec celles fournies par les capteurs ponctuels et des stations totales.

Surveillance des puits de construction

Deux puits de 240 m ont été creusés, permettant l'accès aux opérations du tunnel en dessous. Il s'agissait d'une excavation difficile. La structure était complexe et les nombreuses failles géologiques entraînaient des infiltrations d'eau à plusieurs endroits. En outre, l'écoulement de

l'eau derrière le revêtement des puits risquait constamment d'éroder la terre et la roche le long de la paroi verticale.



Figure 8 : Vue du puits pendant la construction. © ÖBB/Ebner

Les technologies conventionnelles de surveillance géotechnique se sont révélées inappropriées pour ces conditions de déploiement. Premièrement, leur présence physique interférait avec l'excavation et la construction des puits. Deuxièmement, les mesures nécessitaient de long temps d'acquisition et étaient difficiles à acquérir à cause de la présence d'eau. Troisièmement, les cibles réfléchissantes étaient difficiles à nettoyer et, enfin, l'inclinaison du terrain impliquait des observations presque verticales.

Des capteurs à fibre optique ont été intégrés dans les revêtements en béton projeté afin de détecter au plus tôt toute dégradation de la stabilité des puits.

Installation des capteurs distribués à fibre optique

Deux couches du revêtement en béton projeté ont été instrumentées à plusieurs sections transversales avec des câbles de surveillance de contrainte et de température (image 9). Une boucle de 70 m sensible simultanément à la déformation et à la température a été installée. La position des câbles de surveillance a été cartographiée pendant l'installation à l'aide d'une station totale. Les sections surveillées ont été reliées à un instrument de mesure localisé dans la caverne supérieure, évitant ainsi toute perturbation avec les travaux de construction.

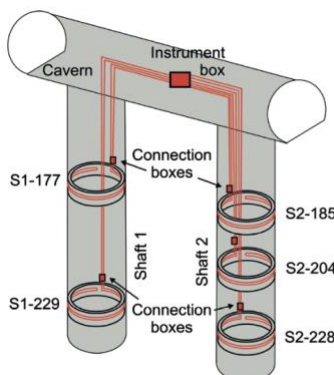


Figure 9 : Système de mesure distribué par fibre optique à l'accès de Götritz © IGMS, TU Graz

Mesures de déformation dans les puits de construction.

Des mesures automatiques ont été réalisées mensuellement pour saisir le comportement du revêtement en béton des puits, avec une résolution spatiale de 0,5 m et un intervalle d'échantillonnage de 0,05 m.

L'évolution de la convergence est représentée dans la figure 10. Au cours de six semaines, un changement maximal d'environ 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ a été détecté sur cette section transversale.

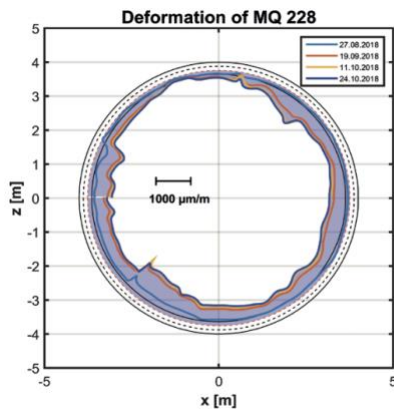


Figure 10 : Distribution des contraintes dans la couche interne du revêtement en béton projeté (section S2-228) à différentes dates à partir de la mesure de référence du 21.08.2018. © IGMS, TU Graz

La campagne de mesure se poursuivra jusqu'à ce que les puits soient remblayés à la fin des opérations de construction et pourra ensuite assurer une maintenance basée sur les informations relatives à l'état de la structure pendant les 150 ans de durée de vie du tunnel.

Surveillance des mouvements de terrain et des déformations structurelles

Pour le tunnel de base du Semmering, une vallée voisine a été transformée en un énorme dépôt à ciel ouvert pour accueillir les matériaux excavés. Conformément aux objectifs de respect de l'environnement, des procédures strictes d'élimination des matériaux garantissent l'intégration sûre et durable du nouvel aménagement géologique dans le milieu naturel de la région.



Figure 11 : Site de dépôt. © ÖBB/Ebner

La transformation a impliqué la réalisation d'un mur de soutènement renforcé de 25 m de haut avec des pentes allant jusqu'à 75°. Compte tenu des défis géologiques et hydrogéologiques, la surveillance des mouvements de terrain pendant et après la construction était cruciale pour garantir l'intégrité de la structure.

Le système de surveillance par fibre optique de fibrisTerre a été utilisé pour détecter rapidement tout mouvement de terrain, autant que tout fluage et érosion à long terme, de façon spatialement distribuée. Des techniques géodésiques conventionnelles, avec des cibles réfléchissantes et une station totale ont été utilisées pour mesurer le déplacement de la structure en surface.

Installation des capteurs distribués à fibre optique

Les capteurs distribués à fibre optique ont été fixés aux géogrilles de renforcement à l'aide de micro-ancrage.



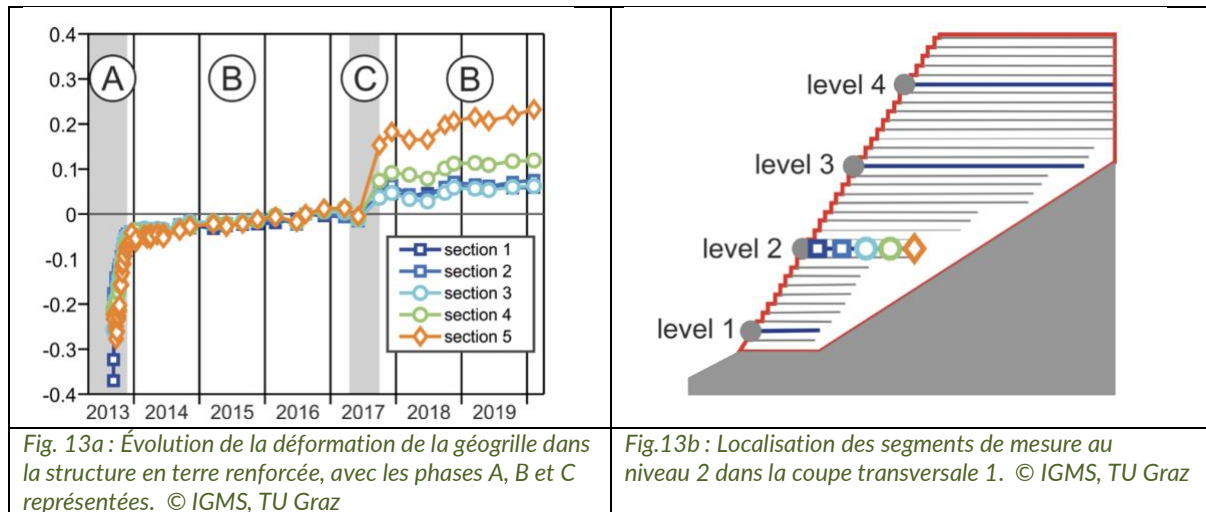
Figure 11 : La géogrille et les câbles de détection ont été déployés à l'intérieur de la structure de soutènement. © IGMS, TU Graz

Suivant un parcours continu sur différents niveaux, une boucle de câbles d'environ 2,5 km détecte simultanément la contrainte mécanique et la température, ce qui permet d'obtenir des mesures de déplacement du terrain, en profondeur, compensées en température.

Résultats des mesures de contrôle structurel

Des mesures hebdomadaires ont été effectuées pendant la phase de construction initiale afin de saisir l'évolution de la déformation.

Le plan de gestion de la sécurité avait défini les actions correctives à prendre en cas de dépassement des seuils de déformation. Aucune des valeurs seuils n'a été dépassée pendant la période de mesure le long des années de remplissage. La déformation s'est développée en trois phases distinctes (Fig.13a). La phase A correspond à la période de construction de la structure. La charge a augmenté au fur et à mesure de l'ajout de couches de terre. Le poids supplémentaire a entraîné une déformation relative jusqu'à 0,4 %. Selon les attentes, un fluage s'est ensuite progressivement accumulé dans les années suivant la construction, comme le montrent les mesures pendant les phases B.



Qu'est-ce qui bouge ?

En 2017, les relevés de déformation ont montré une soudaine augmentation de la déformation dans la phase C (fig. 13a). Une enquête a révélé que la route avait été élargie à l'aide de l'apport de terre supplémentaire afin de pouvoir permettre l'accès à de plus gros camions à benne.



Figure 14 : L'ajout de masses de terre pour élargir la route d'accès a entraîné une augmentation soudaine de la déformation au sein de la structure. © IGMS, TU Graz

La date des travaux d'extension de la rampe d'accès coïncide avec l'augmentation soudaine de la déformation mesurée par le système de détection par fibre optique. La section concernée a été mise sous stricte surveillance afin que des actions correctives puissent être entreprises si l'évolution de la déformation ne s'était pas stabilisée.

Par la suite, la déformation s'est transformée en fluage régulier.

Conclusion - pourquoi le produit fTB 5020 de fibrisTerre mérite-il le "Prix du produit de l'année ?"

Les travaux en cours sur le tunnel de base du Semmering, à l'instar de nombreux autres projets réalisés dans le monde entier, montrent que la détection distribuée par fTB 5020 offre un outil de surveillance géotechnique puissant avec des capacités uniques. La surveillance à distance en

continue permet une construction plus efficace, grâce à des données réelles plutôt qu'estimées ou modélisées.

Ces enregistrements spatialement distribués, continus et en temps réel du comportement des déformations dans les revêtements des tunnels constituent une information précieuse que seule la détection distribuée par fibre optique peut offrir.

Les données en temps réel et la détection précoce des événements géotechniques permettent de réduire les risques pendant la construction et d'améliorer l'efficacité des programmes de maintenance basés sur l'évaluation cognitive de l'état de la structure.

fibrisTerre a conçu le fTB5020 spécifiquement pour le marché de la géotechnique et du génie civil. Le produit garantit

- Réduction des coûts d'exploitation et des besoins de maintenance grâce à une grande fiabilité éprouvée sur le terrain.
- Sécurité d'opération accrue pendant la construction de l'ouvrage car le système de mesure fTB 5020 et les capteurs distribués à fibre optique fournissent des mesures de manière autonome, sans nécessiter d'intervention humaine (pour opération et maintenance) sur site.
- Les capteurs intégrés dans la structure pendant la construction continuent à fournir des données de surveillance géotechnique sur la structure pendant des années et des décennies au cours de la durée de vie de l'ouvrage.
- Excellence en matière de monitoring à fibres optiques, de conception électronique et de développement de logiciels orientés vers l'utilisateur.

Le fTB 5020 fournit un outil précieux dans la boîte à outils du géotechnicien

Références :

Pierre Lecoy. Les fibres optiques en capteurs et en instrumentation. La Revue 3 E. I, 2016, 85. hal-01363852 (<https://hal.science/hal-01363852/document>)

fibrisTerre Case Study : 'Tunnel lining and tunnel shaft deformation monitoring at the Semmering Base Tunnel' (link : <https://www.fibristerre.de/projects/55/strain-monitoring-shotcrete-lining-tunnel-excavation>)

fibrisTerre Case Study : 'Ground Movement and Structural Deformation Monitoring using Distributed Fiber Optic Sensing' (link : <https://www.fibristerre.de/projects/87/ground-movement-and-structural-deformation-monitoring-large-landfill-site>)

Universités ayant choisi un système de mesure fibrisTerre

| | | |
|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| Université Gustave Eiffel | Nanyang Technological University | Università di Padova |
| HTWK Leipzig | Belgian Building Research Institute | Politecnico di Torino |

| | | |
|--|---|--|
| Università degli Studi della Campania 'Luigi Vanvitelli' | Brno University | TU-Delft |
| TU Graz | University of Pretoria | University Of Moratuwa |
| National Buried Infrastrasture Facility, Birmingham University | Une entreprise issue de l'Université de Cambridge | Une entreprise issue de l'Université de l'ETHZ |

Exemples de projets industriels

| | |
|------|---|
| 2022 | Surveillance d'une installation souterraine de stockage d'hydrogène |
| 2022 | Surveillance d'un remblai ferroviaire |
| 2021 | Intégrité des murs de soutènement et des revêtements de tunnels |
| 2020 | Surveillance de l'intégrité d'un puit de forage |
| 2020 | Surveillance de l'installation de câbles sous-marins |
| 2019 | Réseaux urbains d'approvisionnement en eau |
| 2018 | Surveillance des pistes d'aéroport |
| 2017 | Surveillance des géorisques dans les pipelines |
| 2017 | Fondations sur pieux / Construction civile |
| 2016 | Surveillance de la déformation des pipelines |
| 2016 | Surveillance des barrages hydroélectriques |
| 2015 | Assistance à la construction d'un remblai de chemin de fer |
| 2015 | Surveillance des déformations et des fissures dans le béton |
| 2014 | Mesures de la charge statique sur les fondations de pieux en béton |
| 2014 | Surveillance des pieux d'acier en mer |
| 2014 | Surveillance des tuyaux de forage |
| 2013 | Construction de tunnels : Surveillance des pentes |
| 2013 | Surveillance de la déformation d'un remblai de chemin de fer |
| 2009 | Surveillance de la stabilité des pentes côtières |