



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences

# *Les traductions des* **Comptes Rendus**

---

## **Géoscience**

### *Sciences de la Planète*

#### **Capteurs distribués de contrainte à fibres optiques : de la longue à la courte distance**

Corps de l'article traduit par Romain Dziegielinski

Date de publication : 2023-10-16

<https://doi.org/10.5802/crgeos.129-fr>

**Résumé :** Développées depuis plus de quarante ans, les fibres optiques présentent des caractéristiques qui les rendent particulièrement attractives pour la réalisation de capteurs. L'un des points forts de ces capteurs est qu'ils peuvent mesurer différents paramètres physiques de manière distribuée sur une large gamme de longueurs (de quelques cm à des dizaines de kilomètres) avec une résolution spatiale allant du millimètre au mètre. Dans cet article, nous nous intéressons particulièrement aux capteurs à fibre distribuée, principalement basés sur des procédés de diffusion de la lumière, pour mesurer les variations de déformation. Cette revue concerne à la fois les applications nécessitant de grandes longueurs de fibre dans un contexte géologique, ainsi que celles utilisant des longueurs inférieures à un mètre pour le secteur médical. Alors que les capteurs à fibre optique distribués ont déjà montré leur grand potentiel pour les applications à longue portée, les applications à courte portée sont un secteur de niche émergent ces dernières années.

**Mots-clés :** Fibre optique, Déformation, Capteur distribué, Diffusion de la lumière, Nanoparticules, Réseau de Bragg

Article original :

Wilfried Blanc; Luca Schenato; Carlo Molardi; Luca Palmieri; Andrea Galtarossa;

Daniele Tosi, **Distributed fiber optics strain sensors: from long to short distance**. *Comptes Rendus Géoscience*, Volume 354, Special Issue S1 (2022), p. 161-183. <https://doi.org/10.5802/crgeos.129>

Les traductions des Comptes Rendus sont mises à disposition du public dans un but d'accessibilité mais n'ont pas reçu de validation scientifique avant leur publication, seule la publication initiale engage la responsabilité de l'Académie des sciences. Le projet Traduction des Comptes Rendus est soutenu par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche et par la Délégation à la langue française et aux langues de France du ministère de la Culture.

 This translation is licensed under the  
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. Introduction

En 1842, deux articles publiés dans les Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences marquent le début de l'optique guidée et des fibres optiques. Dans le premier article, J. D. Colladon décrit l'expérience de la fontaine lumineuse qu'il venait de découvrir l'année précédente [Colladon 1842]. Dès réception de cet article, F. Arago, alors secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences invite Babinet à décrire son expérience de guidage de la lumière dans une tige de verre [Babinet 1842]. Bien que Babinet ait accordé peu d'importance à sa découverte, il a néanmoins mentionné deux applications potentielles concernant l'éclairage pour les microscopes ainsi que pour la médecine. Ces deux idées seront appliquées à la fin du XIXe siècle et au début du XXe siècle et conduiront à l'avènement de la fibre optique dans les années 1960 à la suite des travaux de C. K. Kao, prix Nobel de physique en 2009 [Kao et Hockham 1966].

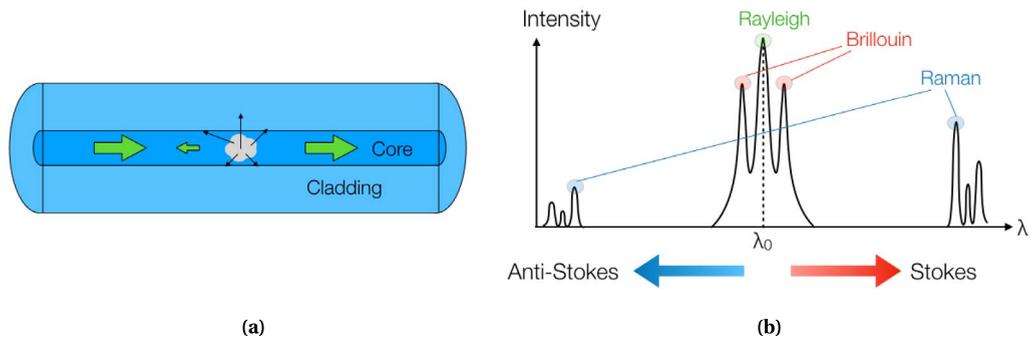
Si l'industrie des télécommunications a été un acteur majeur dans le développement de la technologie des fibres optiques, les caractéristiques de ces guides d'ondes se sont rapidement révélées très attractives pour d'autres applications telles que les lasers et les capteurs [Koester et Snitzer 1964; Culshaw et Kersey 2008]. En effet, ils sont de petite taille (125  $\mu\text{m}$  de diamètre), insensibles aux interférences électromagnétiques, passifs et résistants aux environnements difficiles. En outre, les capteurs à base de fibres optiques classiques (fibres de télécommunications) bénéficient de toute la technologie déjà développée pour les réseaux de télécommunications (sources lumineuses, détecteurs, composants optiques, etc.). Les capteurs à base de fibres optiques offrent donc de nombreux avantages par rapport aux capteurs mécaniques ou électriques. En particulier, la surveillance des paramètres physiques (tels que la température, la contrainte, les concentrations chimiques, etc.) peut être effectuée de manière distribuée tout au long de la fibre. La plage de mesure (longueur maximale de la fibre de détection) peut varier de quelques centimètres à plusieurs dizaines de kilomètres, tandis que la résolution spatiale peut varier de moins d'un millimètre [Luo et al. 2019] à quelques mètres [Palmieri et Schenato 2013]. Une autre caractéristique distinctive des capteurs à fibres optiques est la capacité d'avoir de nombreux points de détection le long d'une seule fibre ou d'un seul câble. Ceci peut être obtenu soit en exploitant des phénomènes de diffusion dans la détection dite distribuée, avec plus de 1 000 000 de points de détection par fibre [Denisov et al. 2016], ou en utilisant le multiplexage des fibres à réseau de Bragg (FBG, fiber Bragg grating en anglais), jusqu'à des milliers de points de détection par fibre, dans une mise en œuvre spécifique [Guo et al. 2015] et [Götten et al. 2020]. Cependant, l'un des principaux inconvénients est le coût des interrogateurs, qui est assez élevé par rapport à ceux utilisés par la plupart des technologies de capteurs classiques, tels que les thermocouples ou les jauges de déformation. Néanmoins, le coût par point de détection devient favorable pour les capteurs à fibres optiques (FOS, fiber optic sensor) lorsqu'un grand nombre de points de détection est nécessaire.

Dans cette revue, nous nous intéressons aux capteurs à fibres pour la détection de contrainte, qui présentent un intérêt non seulement pour les géosciences mais aussi pour les sciences médicales. Dans la partie 2, nous décrivons les trois principaux mécanismes de diffusion impliqués dans la détection, à savoir la diffusion Raman, Brillouin et Rayleigh. La partie 3 est consacrée à la fabrication des fibres (FBG et fibres contenant des nanoparticules). Les applications à longue portée dans les domaines géophysiques et géotechniques sont décrites dans la partie 4. La dernière section traite des applications à courte portée pour le domaine médical.

## 2. Mécanisme de diffusion

Les phénomènes de diffusion se produisant dans les fibres optiques sont le principe de base du fonctionnement de la génération actuelle de capteurs à fibres optiques distribués [Bao et Chen 2012; Schenato 2017], car ils fournissent une réflectivité continue dans chaque segment de la fibre qui peut être localisée avec des méthodes de réflectométrie optique dans le domaine temporel ou fréquentiel.

La figure 1(a) montre un schéma des événements de diffusion qui se produisent dans une fibre optique, qui sont causés par l'interaction entre la lumière entrante et le milieu optique. Lorsque la lumière se propage dans une fibre optique, elle interagit avec les atomes et molécules constitutifs de la fibre. Le champ électrique

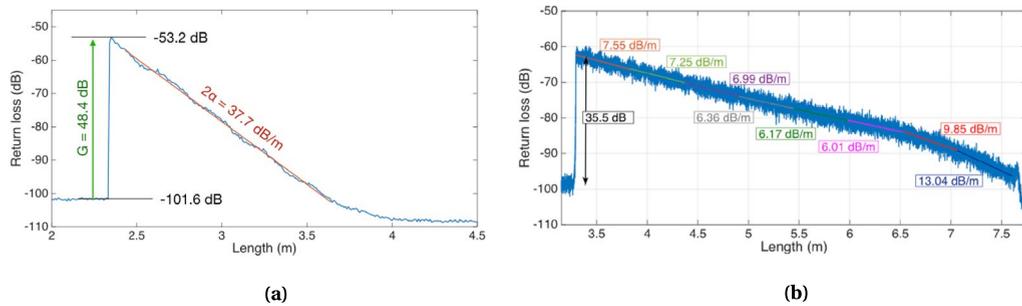


**FIGURE 1.** (a) Schéma de la diffusion élastique se produisant dans une fibre optique. (b) Dépendance en longueur d'onde ( $\lambda$ ) des processus de diffusion dans les fibres optiques lorsque la lumière incidente est un laser ayant une longueur d'onde  $\lambda_0$ .

lumineux qui se déplace dans chaque section de la fibre génère des dipôles électriques dépendant du temps, qui provoquent des ondes lumineuses secondaires qui se diffusent autour de la fibre. Le signal de diffusion a une puissance inférieure de plusieurs ordres de grandeur à celle de la lumière incidente, et n'affecte donc pas la propagation de la lumière de manière significative. La lumière diffusée par la fibre est au contraire émise dans un grand nombre de directions; une partie de cette émission est couplée en retour dans la fibre, et constitue ce que l'on appelle la rétrodiffusion que l'on peut observer dans chaque section de la fibre optique. Des capteurs optiques distribués interrogent le signal de rétrodiffusion qui est émis en continu par la fibre testée et détectent les changements d'intensité et le décalage de fréquence qui se produisent dans chaque section de la fibre. À cet égard, les capteurs distribués diffèrent des autres capteurs à fibres optiques parce qu'ils n'utilisent pas de dispositifs qui sont inscrits (tels que des réseaux) ou fabriqués à l'extérieur (tels que des interféromètres) dans la fibre pour agir comme un dispositif de détection, mais plutôt la fibre elle-même se comporte comme un capteur continu, résolvant le mesurande physique tout au long de la fibre [Bao et Chen 2012].

Les capteurs distribués peuvent interroger les phénomènes de diffusion Rayleigh, Raman ou Brillouin, qui dépendent de la longueur d'onde, comme illustré à la figure 1(b). La diffusion Rayleigh est utilisée dans plusieurs capteurs distribués, notamment par réflectométrie à rétrodiffusion optique (OBR, optical backscatter reflectometry en anglais) [Froggatt et Moore 1998] pour la détection à courte distance, et par réflectométrie optique de phase dans le domaine temporel ( $\phi$ -OTDR, optical time-domain reflectometry en anglais) pour la détection à longue distance [Eickhoff et Ulrich 1981]. La caractéristique clé de la diffusion Rayleigh est que les ondes réfléchies ont la même longueur d'onde que celle de l'onde incidente, et qu'il s'agit donc d'une diffusion élastique. Optiquement, elle peut être modélisée comme une variation de l'indice de réfraction du cœur de la fibre en fonction de l'espace et du temps; comme l'indice de réfraction de la silice dépend de la température et de la contrainte exercée sur la fibre, l'interrogation de la diffusion Rayleigh est directement liée aux mesures distribuées de la contrainte ou de la température [Bao et Chen 2012; Froggatt et Moore 1998].

La diffusion inélastique implique au contraire un changement de fréquence des ondes lumineuses diffusées par la fibre par rapport à l'onde incidente. La longueur d'onde de la lumière rétrodiffusée par des événements de diffusion inélastiques a à la fois des composantes qui sont décalées vers le rouge (Stokes) et vers le bleu (anti-Stokes) par rapport à la lumière incidente [Bao et Chen 2012]. La diffusion Raman implique le plus grand décalage de longueur d'onde entre l'incidence et les composantes Stokes/anti-Stokes, environ 90 nm pour les capteurs fonctionnant à 1550 nm. Bien qu'elle ne soit pas utilisée directement dans la détection des contraintes, la diffusion Raman est à la base des capteurs de température distribués à longue portée, car le rapport entre l'intensité lumineuse anti-Stokes et Stokes dépend de la température [Farahani et Gogolla 1999]; pour cette raison, la diffusion Raman est un élément constitutif des capteurs distribués de température et de contrainte (DTSS, distributed temperature and strain sensors en anglais) qui sont utilisés dans la surveillance



**FIGURE 2.** Trace de diffusion de fibres de rétrodiffusion améliorées, rapportant la perte de retour analysée sur l'instrument OBR pour chaque section de fibre. a) Analyse d'une fibre à haut gain et détermination des paramètres de diffusion ; b) Uniformité d'atténuation d'une fibre à faible perte, rapportant l'atténuation unidirectionnelle de la fibre dans chaque section.

des pipelines [Inaudi et Glisic 2010].

La diffusion Brillouin implique les oscillations acoustiques du verre, et permet pour cette raison la détection de contraintes dynamiques ou de signaux acoustiques le long de la fibre [Coscetta et al. 2020]. Les champs acoustiques agissant sur la fibre induisent des variations périodiques de l'indice de réfraction de la fibre dues à l'effet élasto-optique, ce qui se traduit par une onde rétrodiffusée présentant un léger décalage de longueur d'onde (environ 90 pm à 1550 nm) qui est proportionnel à la vitesse de l'onde acoustique. Une large gamme de capteurs distribués de contrainte et acoustiques a été développée, soit en analysant la lumière réfléchie par la fibre, soit en utilisant deux sources optiques de part et d'autre de la fibre de détection [Brillouin optical time-domain analyzer (BOTDA) Li et al. 2008a].

La diffusion Rayleigh (et, dans une moindre mesure, la diffusion inélastique) est un facteur de perte des fibres optiques, et c'est pourquoi des efforts de recherche ont été déployés pour concevoir des fibres optiques monomodes (SMFs, single-mode fibers en anglais) qui minimisent la diffusion de la lumière, jusqu'à l'atténuation actuelle de 0,14 dB/km [Hasegawa et al. 2018]. Cependant, l'avènement des capteurs distribués, a récemment inversé la tendance [Tosi et al. 2020b : comme la diffusion est le signal détecté par les capteurs distribués, les chercheurs ont essayé de concevoir des fibres qui ont une diffusion plus élevée, aux dépens de pertes de propagation plus importantes. Les fibres de rétrodiffusion améliorées (EBFs, enhanced backscattering fibers en anglais) atteignent deux objectifs : elles renvoient un rapport signal/bruit plus élevé dans la détection de contrainte, ce qui a amélioré la précision des technologies de détection des formes pour l'imagerie médicale [Parent et al. 2018] ; et elles permettent le multiplexage au niveau de la diffusion (SLMux, scattering-level multiplexing en anglais) [Tosi et al. 2020b] qui convertit un interrogateur à un seul canal en un réseau de détection multifibre, ce qui est essentiel pour la détection des formes ou les dispositifs médicaux rigides en trois dimensions [Beisenova et al. 2019a].

Une mise en œuvre réussie d'un EBF utilise des nanoparticules à base de MgO allongées dans le cœur de la fibre, pour augmenter la réflectivité locale de manière significative. La figure 2(a) montre la trace de diffusion d'un tel EBF, qui atteint un incrément de diffusion d'environ cinq ordres de grandeur [Tosi et al. 2020a]. Le gain de diffusion est défini comme l'incrément de diffusion fourni par l'EBF par rapport à un SMF, et est mesuré au niveau de l'interconnexion EBF-SMF ; la fibre présentée dans la figure 2(a) a un gain  $G = 48,4$  dB, et est l'une des valeurs les plus élevées enregistrées jusqu'à présent car elle s'approche des niveaux de réflectivité des réseaux faibles. À l'inverse, les fibres EBF présentent une forte atténuation bidirectionnelle ( $2\alpha$ ), estimée dans la pente de la trace de diffusion (37,7 dB/m). Différents modèles de fibres à base de MgO ont montré une atténuation allant de 300 dB/m jusqu'aux 14,3 dB/m récemment rapportés [Tosi et al. 2021]. Étant donné que les nanoparticules ont une distribution plutôt aléatoire dans la fibre, en termes de densité locale et de position relative par rapport au cœur, l'atténuation n'est pas constante mais plutôt fluctuante : la figure 2(b)

montre l'atténuation d'une fibre dopée aux nanoparticules à base de MgO à faible perte, qui varie de 6,0 dB/m à 13,0 dB/m dans les deux sens, et qui est l'une des valeurs les plus faibles rapportées jusqu'à présent pour les fibres à forte diffusion.

Les principales alternatives aux fibres dopées au MgO sont basées sur l'augmentation de la réflectivité locale dans la fibre par l'inscription de nano-réseaux [Yan et al. 2017], de réflecteurs Bragg distribués [Monet et al. 2019], de nanopores [Reupert et al. 2019; Donko et al. 2018; Blanc et al. 2020] ou d'autre composition de nanoparticules [Veber et al. 2019; Bulot et al. 2021]; plus pertinent encore, une inscription de 25 cm d'un réflecteur faible à large bande utilisant un laser fs, atteignant un gain de diffusion jusqu'à 45 dB, a été rapportée par Yan et al. [2017].

### 3. Fabrication de fibres optiques

Les fibres optiques sont généralement obtenues par étirage à haute température d'une tige appelée préforme. L'avènement des procédés de préparation de préformes par dépôt chimique en phase vapeur dans les années 1970 a considérablement réduit l'atténuation optique, de 1000 à 0,2 dB/km en 10 ans. Le dépôt en phase vapeur consiste à faire réagir des gaz ( $\text{SiCl}_4$  et  $\text{O}_2$  par exemple) pour former de la suie ( $\text{SiO}_2$ ) qui est déposée sur un substrat. Les principaux procédés de fabrication des préformes sont le OVD (Outside Vapor Deposition, dépôt externe en phase vapeur), le VAD (Vapor Axial Deposition, dépôt axial en phase vapeur) et le MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition, dépôt chimique en phase vapeur modifié). Ces procédés ont été développés pour préparer un verre « parfait » : (i) le verre le plus homogène possible pour réduire la diffusion de la lumière (c'est-à-dire pour améliorer la transparence) et (ii) pour limiter la présence de défauts ou d'impuretés pouvant induire des bandes d'absorption. Les fibres présentées dans cette revue reposent plutôt sur la présence de ces défauts. Des défauts tels que les ODC (Oxygen Deficient Center, centre de lacune d'oxygène) rendent le verre photosensible [Skuja 1998] et permettent de photo-inscrire des réseaux de Bragg, et la présence de nanoparticules augmente la diffusion de la lumière.

#### 3.1. *Fibres à réseaux de Bragg*

Initialement développés pour l'industrie des télécommunications, les FBG sont maintenant couramment utilisés dans les applications de détection [Kashyap 2009], ainsi que dans des environnements difficiles et extrêmes [Mihailov 2012; Kumari et al. 2019]. Fondamentalement, le FBG est un filtre optique qui reflète les longueurs d'onde ciblées. Pour atteindre cet objectif, la structure d'un FBG correspond à une modulation périodique longitudinale de l'indice de réfraction du cœur de la fibre. L'interaction entre la lumière et le FBG peut être analysée à l'aide de la condition de Bragg exprimée par la formule :  $\lambda_B = 2 \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Lambda_G$  où  $n_{\text{eff}}$  est l'indice de réfraction effectif vu par la lumière, et  $\Lambda_G$  est la période de la variation de l'indice. Toutes les longueurs d'onde de Bragg ( $\lambda_B$ ) satisfaisant cette condition sont réfléchies. Comme l'indice de réfraction et la période de réseau varient en fonction de la température ou des perturbations mécaniques, le FBG peut être utilisé comme capteur en mesurant le décalage de la longueur d'onde de Bragg [Kersey et al. 1997]. La manière la plus courante d'obtenir un FBG est d'utiliser la photosensibilité du cœur de fibre. Les éléments dopants tels que le germanium (couramment utilisé dans les fibres de télécommunication pour augmenter l'indice de réfraction) induisent une augmentation de l'indice de réfraction lorsqu'ils sont exposés à la lumière visible ou UV. Pour obtenir la modulation spatiale dans le sens longitudinal, on utilise un réseau de diffraction tel qu'un masque de phase pour créer un motif d'interférence. Les FBG peuvent être distingués en fonction de leur mécanisme de formation. Le FBG le plus courant est le type I. Un faible changement d'indice de réfraction peut être obtenu en irradiant avec une lumière UV (typiquement 244 nm) pour exciter l'ODC. La densification du verre permet d'augmenter le changement d'indice de réfraction. Ce type de FBG peut fonctionner à une température allant jusqu'à 400–500 °C. En outre, les FBG de type I peuvent être inscrits à travers différents revêtements en utilisant également un laser femtoseconde IR [Habel et al. 2017]. Pour le type II, un laser femtoseconde UV de haute puissance de crête est utilisé. Le changement d'indice de réfraction est provoqué par l'ionisation

multiphotonique qui modifie le réseau de verre amorphe. Ces FBG sont caractérisés par une réflectivité élevée et une température de fonctionnement élevée (800–1000 °C). Comme ils nécessitent une seule exposition au laser, les réseaux de type II peuvent être photo-inscrits lors de l'étirage de la fibre [Askins et al. 1994].

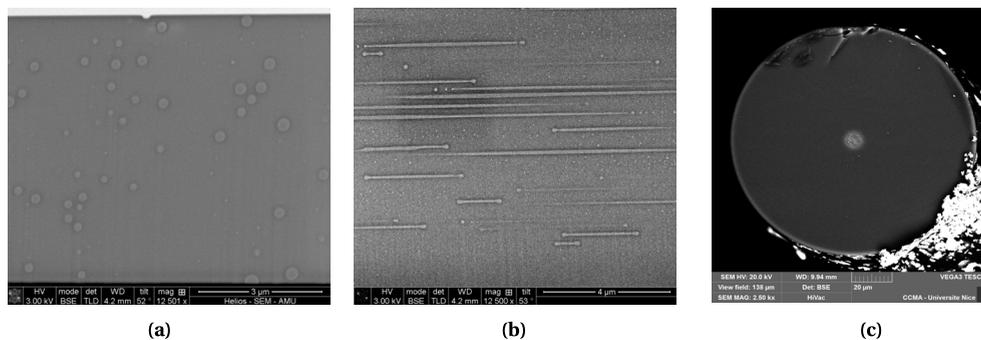
La photosensibilité des fibres peut être améliorée en exposant la fibre à une pression élevée d'hydrogène (« charge d'hydrogène »). Néanmoins, selon la littérature, ce procédé peut nuire à la stabilité thermique des FBG, qui peut être rétablie par un traitement thermique approprié des fibres, tel qu'un recuit thermique [Li et al. 2008b, qui est une méthode bien connue pour obtenir des FBG régénérés [Polz et al. 2021]. La charge en hydrogène, en ce sens, est importante, mais pas essentielle, pour obtenir une modulation d'indice avec une amplitude suffisante pour un fonctionnement à des températures extrêmes [Canning et al. 2008, 2010]; néanmoins, il a été démontré que la régénération peut être obtenue même sans charge d'hydrogène, bien que pour des FBG limités à un fonctionnement à basse température [Linder et al. 2009].

Une autre classe de réseaux de Bragg est celle des réseaux dits à longue période (LPG, Long-Period Gratings en anglais) [Wang 2010]. Ils diffèrent des FBG standards car leur indice de réfraction varie avec une période de plusieurs centaines de micromètres. En raison de la période de réseau plus longue, le mode guidé du cœur fondamental se couple à des modes de gaine discrets à propagation vers l'avant, qui s'atténuent rapidement pendant la propagation. Par conséquent, les spectres de transmission présentent une série de bandes de perte correspondant à un couplage de mode de gaine distinct. La longueur d'onde de perte de crête transmise correspondante est donnée par  $\lambda_m = (n_{\text{eff}} - n_{\text{clad}}^{(m)})\Lambda_G$ , où  $n_{\text{eff}}$  et  $n_{\text{clad}}^{(m)}$  sont respectivement l'indice effectif du mode se déplaçant dans le cœur, et le mode de gaine LP<sub>0m</sub> auquel le mode de cœur est couplé. Par ailleurs, d'autres capteurs ponctuels, exploitant des effets interférométriques tels que la cavité Fabry–Perot et Michelson peuvent être directement fabriqués sur une fibre optique [2021]. Malgré l'intérêt suscité par leur résolution et leur précision intrinsèque, ces capteurs sont difficiles à multiplexer et, par conséquent, ils sortent du cadre de cette revue.

### 3.2. *Fibres contenant des particules*

La technique MCVD est le procédé utilisé pour préparer les préformes étirées en fibres contenant des particules rapportées dans cette revue [Blanc et al. 2011]. Depuis son développement dans les années 1970, cette méthode est couramment utilisée dans l'industrie pour préparer des fibres optiques spéciales telles que les lasers à fibre ou les capteurs [Li 2012]. Dans un premier temps, des couches vitreuses sont déposées à l'intérieur d'un tube de silice. La composition de ces couches est déterminée par l'utilisation de différents gaz réactifs transportés dans le tube par l'oxygène. Les espèces gazeuses sont limitées aux porteurs de SiCl<sub>4</sub>, GeCl<sub>4</sub>, POCl<sub>3</sub>, fluor et bore. Des éléments additifs (tels que Mg) sont incorporés lors de l'étape de dopage en solution. Avec ce procédé, une couche poreuse, déposée par MCVD sur la surface interne du tube de silice, est imbibée d'une solution de sels de chlorures métalliques (par exemple MgCl<sub>2</sub>) dissous dans de l'alcool ou de l'eau. Après élimination de la solution, la couche poreuse est séchée, densifiée et vitrifiée à haute température (jusqu'à 1800 °C). Enfin, le tube est fermé lors de l'étape dite d'effondrement (à une température supérieure à 2000 °C) pour former une tige dite préforme. Pour étirer cette préforme en fibre, la température doit être supérieure à la température de ramollissement ( $\approx 1650$  °C pour le verre de silice), typiquement 2000 °C.

Des images MEB typiques de la préforme et de la fibre contenant des nanoparticules de silicate à base de MgO sont présentées dans la figure 3. Les particules, dont le diamètre moyen dépend de la concentration dans la solution de dopage, sont plus blanches que la matrice de verre car le magnésium est majoritairement réparti dans les particules de silicate. Cependant, leur composition suit un chemin complexe. En effet, il a été rapporté que la composition des particules dépend de leur taille : une concentration plus élevée de Mg est mesurée dans les plus grosses particules [Blanc et al. 2019]. Pour les particules beaucoup plus grandes que 10 nm, l'étape d'étirage est une étape importante à considérer car elles peuvent s'allonger et même se briser en raison de l'instabilité de Rayleigh-Plateau [Vermillac et al. 2017, 2019]. Ensuite, les caractéristiques de la couche poreuse, la concentration de la solution de dopage et les conditions d'étirage doivent être soigneusement déterminées



**FIGURE 3.** Images MEB de la section transversale longitudinale (a) d'une préforme et (b) d'une fibre contenant des nanoparticules. L'axe de la représentation est horizontal. (c) Image MEB en coupe transversale d'une fibre contenant des nanoparticules.

pour optimiser les caractéristiques des particules (taille, densité, morphologie, etc.), c'est-à-dire pour régler les propriétés de diffusion de la lumière.

#### 4. Applications à longue portée dans les domaines géophysique et géotechnique

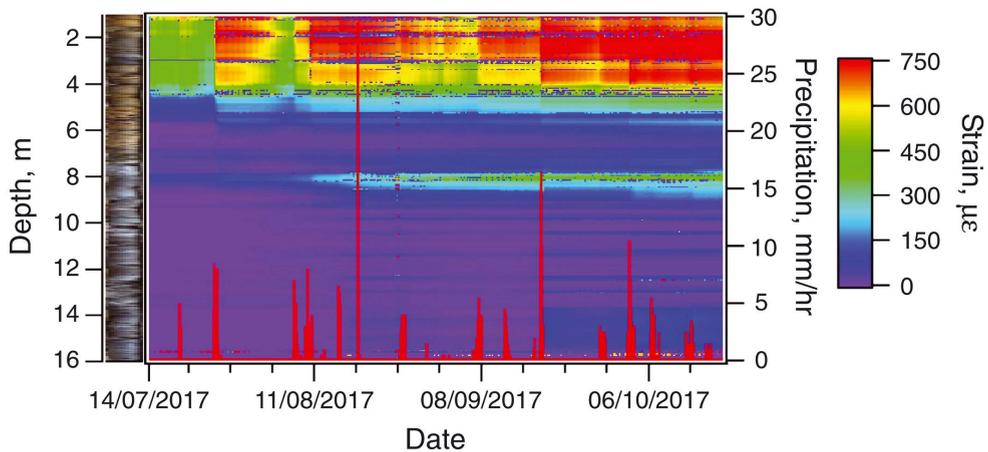
Au cours des 20 dernières années, des capteurs à fibres optiques distribuées ont été proposés pour traiter des problèmes de surveillance dans de nombreux domaines différents. La surveillance géophysique et géotechnique est un domaine d'application particulier où l'exploitation de la détection par fibre optique distribuée a connu un grand essor. En effet, la capacité de mesurer différents paramètres physiques sur de très longues distances avec une forte densité spatiale de points de mesure, l'alimentation et le contrôle à distance, ainsi que la robustesse des capteurs font que cette technologie est adaptée pour relever les défis spécifiques de ces domaines d'application. Étant donné que ces domaines de surveillance nécessitent souvent de couvrir de vastes zones, des FOS distribués (DFOS, distributed fiber optic sensor) ont commencé à être utilisés. Certaines solutions de DFOS ont même atteint le marché et sont devenues des outils bien étudiés et largement acceptés.

Dans cette partie, nous présenterons quelques exemples sélectionnés de DFOS pour la surveillance géophysique et géotechnique à longue distance. Avec le terme « longue distance », nous envisageons spécifiquement les applications où la longueur de la fibre optique de détection varie de quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres. Bien qu'il existe de nombreuses applications spécifiques des DFOS nous avons choisi d'aborder et de résumer seulement quelques travaux sélectionnés liés à la surveillance des contraintes statiques et de la température des risques géologiques, et à la surveillance sismique. Le lecteur intéressé est invité à consulter les nombreuses revues de la littérature pour plus de détails [Schenato 2017; Fenta et al. 2021; Shi et al. 2021].

La technologie de détection distribuée la plus couramment utilisée pour la surveillance des contraintes et des glissements est la détection par diffusion Brillouin. En revanche, la détection par diffusion Raman, qui est insensible aux contraintes, est la plus utilisée pour la surveillance de la température. En outre, les capteurs basés sur la diffusion Rayleigh sont également utilisés pour la surveillance des contraintes statiques en géotechnique, mais ils sont principalement utilisés pour la surveillance sismique.

##### 4.1. Détection de contrainte distribuée

En ce qui concerne la surveillance des contraintes statiques, les DFOS sont largement utilisés pour surveiller les processus géomorphologiques, par exemple, pour les glissements de terrain, les affaissements et mouvement du sol, les levées et les digues. Les glissements de terrain sont souvent déclenchés par de fortes précipitations qui saturent le sol, le déstabilisant ainsi et déterminant sa rupture sous contrainte de cisaillement. La



**FIGURE 4.** Champ de déformation en fonction du temps le long d'un trou de forage de 16 m de profondeur foré dans un glissement de terrain au Japon ainsi que les informations sur la stratigraphie du sol et les précipitations [reproduit avec la permission de Kogure et Okuda 2018].

détection précoce des mouvements de terrain est cruciale pour donner suffisamment de temps aux autorités pour l'évacuation de la population. Dans le but de surveiller la contrainte exercée par le mouvement du sol, les fibres optiques doivent être couplées au sol, afin d'être entraînées par le mouvement du sol : lorsque le sol subit un effondrement ou un glissement, la fibre s'étire en conséquence. Les câbles de détection sont souvent enfouis dans des tranchées peu profondes ou simplement ancrés au sol par des piquets. Selon l'installation, des glissements de terrain peu profonds et des mouvements de pente lents peuvent être détectés grâce à l'allongement induit dans la fibre de détection.

L'un des premiers exemples de surveillance des glissements de terrain utilisant un DFOS basé sur la diffusion Brillouin est présenté dans Yoshida et al. [2002]. La zone de glissement de terrain, d'une surface d'environ 70 ha (1500 × 500 m) a été instrumentée avec environ 1200 m de fibre. La fibre a été disposée en quadrillage de 90 m dans la direction de déplacement du glissement de terrain et de 80 m dans la direction transversale. Une partie du câble a été enterrée à 50 cm de profondeur, et une autre partie a été ancrée en la fixant avec des plaques métalliques. La résolution spatiale de l'interrogateur Brillouin a été limitée à 1 m, suffisamment pour fournir une carte détaillée du champ de déformation dans la zone surveillée. Une approche similaire, avec un capteur basé sur la diffusion Brillouin et avec le câble interceptant transversalement le mouvement de glissement de terrain, a été proposée dans Iten et al. [2009]. Dans ce travail, seulement 80 m de câble ont été posés dans le sol sous un sentier de randonnée, à l'intérieur d'une petite tranchée, et couplés au sol par des micro-ancres. Dans le même article, il est fait mention de la mise en œuvre d'un système de surveillance équipé de DFOS géotechnique appliqué à un tronçon de 60 km de GNL au Pérou, affecté par des risques géologiques.

Une autre approche, rendue possible par la capacité de longue portée des DFOS, consiste à installer la fibre dans une configuration en boucle à travers un réseau de clous d'ancrage, de tubes inclinomètres et de poutres de cadre, comme dans Shi et al. [2008]. Un déploiement similaire a également été proposé par Hoepffner et al. [2008], au glissement de terrain d'Aggenalm (Alpes bavaroises) où un interrogateur Brillouin (ainsi qu'un interrogateur Raman pour la compensation de température) a été utilisé pour sonder un câble de détection de 90 m de long, en partie enfoui dans le sol et en partie à l'intérieur d'un trou de forage inclinométrique dans une configuration en boucle. Plus récemment, à Kogure et Okuda [2018], un DFOS basé sur la rétrodiffusion Rayleigh a été installé dans un trou de forage à une profondeur de 16 m pour détecter le profil de déformation verticale d'un glissement de terrain avec une résolution spatiale de 10 cm. Malgré la longueur limitée de la fibre déployée dans le trou de forage, la longueur totale du câble était de plus de 450 m avec l'interrogateur à distance

hébergé à plus de 200 m du trou de forage dans une structure protégée. Dans cette étude, la variation de la déformation le long de la profondeur du trou de forage a été corrélée avec la stratigraphie du sol, tandis que son évolution temporelle a montré une corrélation claire avec les données de précipitations qui ont déclenché le glissement de terrain (Figure 4).

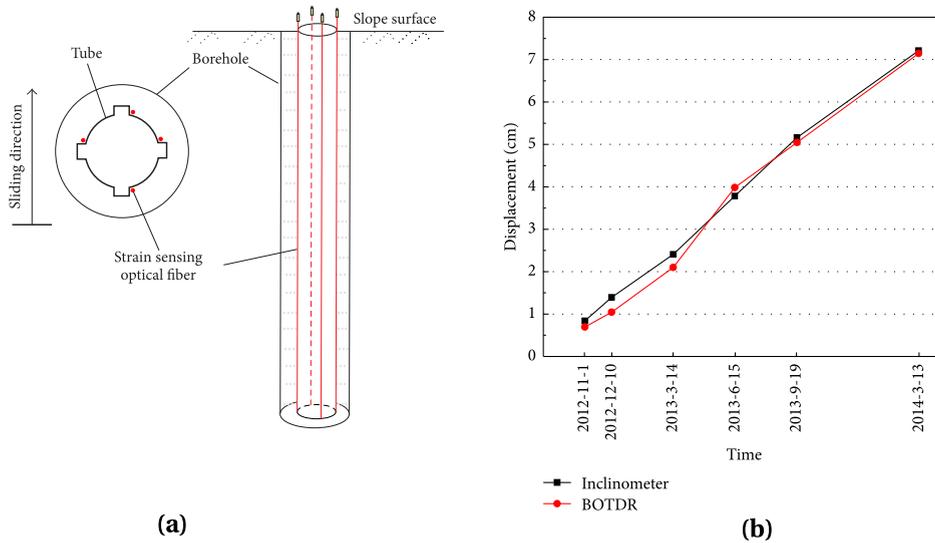
De même, Zhang et al. [2018] ont intégré un câble dans un trou de forage et cartographié la zone de compaction ou de rebond le long du profil vertical jusqu'à 150 m de profondeur au moyen de la technique de diffusion Brillouin. Le déploiement simultané de forages et de câbles équipés de DFOS installés de part et d'autre de la zone d'un glissement de terrain a également été utilisé pour produire et valider des modèles plus précis sur la déformation de cisaillement à différents endroits d'un glissement de terrain comme dans Sang et al. [2019].

L'invasivité limitée du câble permet également l'intégration de DFOS dans les ancrages au sol, qui sont des renforcements géotechniques subhorizontaux mis en place pour remédier aux pentes instables. Un système d'ancrage de sol est composé d'une barre d'acier creuse, installée par une technique d'auto-forage dans le sol ou la roche, et elle est souvent intégrée à des armatures cimentées dans le trou intérieur. Dans Cola et al. [2019], les auteurs ont installé un câble dans le trou de certains ancrages de sol, côte à côte avec les armatures et cimenté avec eux. Les ancrages mesuraient 40 m de long et les câbles étaient interrogés par un OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometer) basé sur la diffusion Rayleigh avec une résolution spatiale de 1 cm dans le but de déterminer le profil de déformation réparti le long des clous. En définitif, le système mesure à la fois la répartition de la force axiale dans l'ancrage et le frottement d'interface sol-ancrage. Plus précisément, l'intégration de DFOS permet de déduire des informations sur l'état de santé de l'ancrage, mais favorise également l'ancrage elle-même en tant que capteur, permettant de sonder l'évolution du champ de contraintes dans les sols environnants et donc de fournir des informations sur le glissement de terrain, telles que la position de l'interface de glissement. De même, des informations sur la santé structurelle et sur le frottement du sol peuvent être déduites en incorporant le DFOS dans des pieux de fondation soumis à des essais de charge statique [Pelecanos et al. 2018; Bersan et al. 2018].

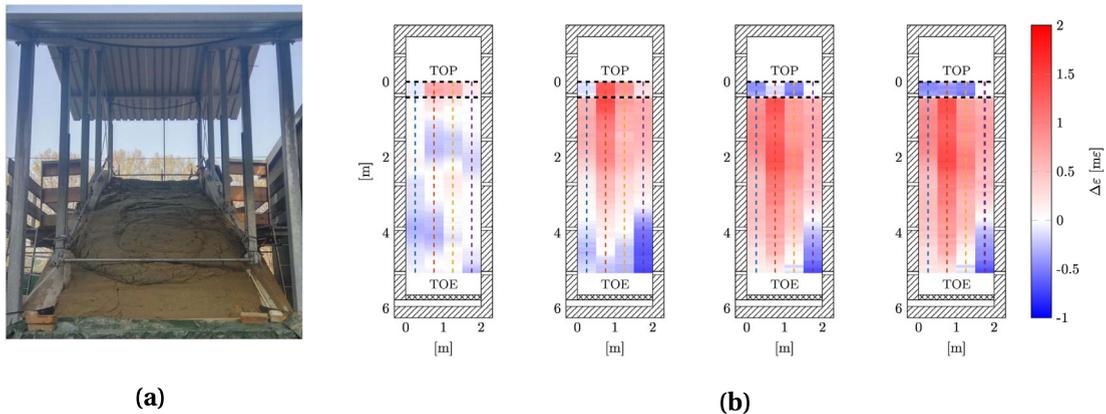
Bien que ces installations puissent ressembler à un inclinomètre, les DFOS mesurent la déformation ou sa variation, tandis que les inclinomètres mesurent les changements d'inclinaison de la pente et la déformation réelle. Malgré cela, plusieurs auteurs ont essayé de mettre en œuvre des inclinomètres à DFOS équipant des tuyaux ou des boîtiers de forage, jusqu'à quelques dizaines de mètres de profondeur, de trois fibres optiques ou plus et exploitant la théorie d'Euler-Bernoulli et s'appuyant sur l'application d'une méthode de quadrature ou d'une méthode classique du faisceau conjugué [Lenke et al. 2011; Minardo et al. 2014; Sun et al. 2016; Huang et al. 2018; Minutolo et al. 2020; Zhang et al. 2020]. Exemple d'un de ces inclinomètres, installé dans un glissement de terrain dans la zone du réservoir des Trois-Gorges, illustré à la figure 5.

Au fil des ans, l'amélioration de la résolution spatiale des interrogateurs, a permis d'effectuer des expériences sur des modèles physiques, où une résolution spatiale à l'échelle du centimètre est nécessaire en raison de la taille limitée de l'installation. Par exemple, dans Schenato et al. [2017], les chercheurs ont instrumenté un modèle physique à grande échelle ( $6 \times 2 \times 3,5$  m) avec 30 m de câble conçu en fibre ondulée déployé sur une trajectoire sinueuse orientée le long de la direction du glissement de terrain. La fibre a été déployée sous la surface à une interface de glissement prédéterminée et l'ondulation sur la gaine de fibre garantissait un couplage suffisant avec le sol. Au moyen de précipitations artificielles, la pente a été poussée à s'effondrer tout en surveillant la déformation le long de la fibre. Les auteurs ont donc été en mesure de fournir une carte détaillée de la distribution spatiale de la déformation et de son évolution dans le temps, avec des indications sur l'efficacité du couplage et même des signes précoces de rupture de pente. La figure 6 montre le modèle physique sur la gauche et la carte du champ de déformation aux différents stades du glissement de terrain et du couplage sol-câble : de gauche à droite sont représentés le couplage initial, le couplage complet, le couplage partiel et la phase de post-effondrement. Des expériences similaires ont été menées par d'autres groupes, mais dans des modèles physiques plus petits, exploitant à la fois les techniques de Brillouin [Damiano et al. 2017; Song et al. 2017; Darban et al. 2019] et de Rayleigh [Papini et al. 2020].

La détection distribuée des déformations est également appliquée aux digues des cours d'eau depuis le tout

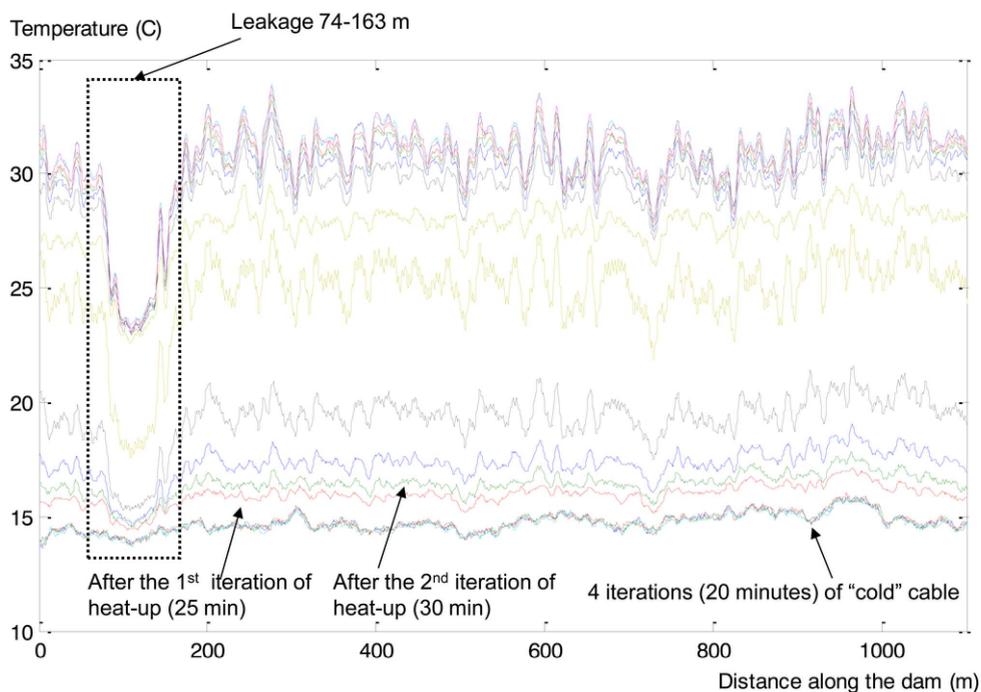


**FIGURE 5.** (a) Exemple de disposition des fibres dans un inclinomètre à DFOS. (b) Déplacement mesuré par un inclinomètre standard et un inclinomètre équipé de DFOS pendant l'évolution d'un glissement de terrain [reproduit avec la permission de Sun et al. 2016].



**FIGURE 6.** (a) Modèle physique d'un glissement de terrain instrumenté avec une fibre optique pour la détection de contraintes. (b) Évolution du champ de contraintes, en référence au couplage entre le sol qui s'effondre et le câble [reproduit et modifié avec la permission de Schenato et al. 2017].

début des années 2000 [Naruse et al. 2000; Zhang et al. 2010; Lei et al. 2012; Zhou et al. 2013]. L'objectif de ces travaux était la détection précoce de l'effondrement, via une technique de surveillance des déformations au moyen de la technique de diffusion Brillouin. En général, les câbles ont été enterrés à quelques dizaines de centimètres de profondeur dans les escarpements des digues en une trajectoire sinueuse dans le sens des digues. Seuls quelques-uns d'entre eux ont mis en œuvre la compensation de température avec une partie des fibres laissées dans des conditions où elles ne subissent pas de déformation ou en employant un système supplémentaire basé sur la diffusion Raman. Pour améliorer la couverture spatiale des capteurs sur l'escarpement des berges, Nöther et al. [2008] et Artières et al. [2010] ont proposé l'utilisation de géotextiles équipés de fibres optiques.



**FIGURE 7.** Température mesurée dans la digue lors du chauffage du câble hybride selon la méthode thermométrique « active » (les courbes de couleurs différentes correspondent à des horodatages différents). La section du câble où la température chute correspond à la position de l’infiltration, où le sol a une plus grande conductivité thermique [reproduit avec la permission de Pyayt et al. 2014].

#### 4.2. 4.2 Détection distribuée de la température et de la pression

La surveillance des digues est également l’une des applications les plus précoces de DFOS pour la mesure distribuée de la température dans le sol, via la technique basée sur la diffusion Raman. Le but de ce type de surveillance est la détection d’un comportement anormal de la température dans le sol, souvent corrélé à un flux de filtration dangereux et à des infiltrations, qui peuvent conduire à l’érosion et à l’effondrement définitif de la structure. Afin d’identifier efficacement les événements critiques, il est a priori obligatoire d’effectuer une campagne de mesure à long terme pour déterminer le comportement thermique normal de la structure, qui fluctue en fonction des saisons. En outre, le système de détection doit sonder la structure avec une résolution spatiale adéquate, car les premiers flux de filtration sont probablement très petits. Les interrogateurs Raman commerciaux standard actuels offrent une résolution spatiale de 0,25-1 m sur une portée de quelques kilomètres. Néanmoins, malgré cette capacité de longue portée, dans la plupart des installations rapportées, la longueur des fibres est limitée à quelques centaines de mètres [Shanafield et al. 2018]. La précision nécessaire pour détecter un changement de température anormal doit être assez grande, de l’ordre de 0,1 °C, car très souvent l’écoulement d’eau de filtration atteint rapidement l’équilibre thermique avec le sol environnant. Ceci nécessite généralement un long temps de mesure, de l’ordre de quelques minutes, ce qui correspond encore aux besoins de ce domaine d’application [Bersan et al. 2019].

Sur la base de ces hypothèses, les premières installations de DFOS de température dans les digues [Albalat et Garnero 1995; Fry 1997; Aufleger et al. 1997; Johansson et Sjö Dahl 2004], ont eu du mal à identifier efficacement ces anomalies. Aujourd’hui, une grande partie de la recherche sur l’utilisation de DFOS dans la surveillance des digues est basée sur la méthode thermométrique dite « chauffante » ou « active » [Perzmaier et al. 2004; Sayde et al. 2010; Cola et al. 2021]. Ce procédé consiste à mesurer la température le long d’une fibre optique chauffée;

généralement le chauffage est obtenu par injection de courant dans des fils électriques regroupés avec les fibres optiques dans le même câble. Au lieu de la température réelle, la constante de temps des phases de chauffage et de refroidissement est utilisée pour caractériser le degré de saturation du sol et également pour suivre les flux de filtration actifs qui dissipent la chaleur plus rapidement [Pyayt et al. 2014], comme le montre la figure 7.

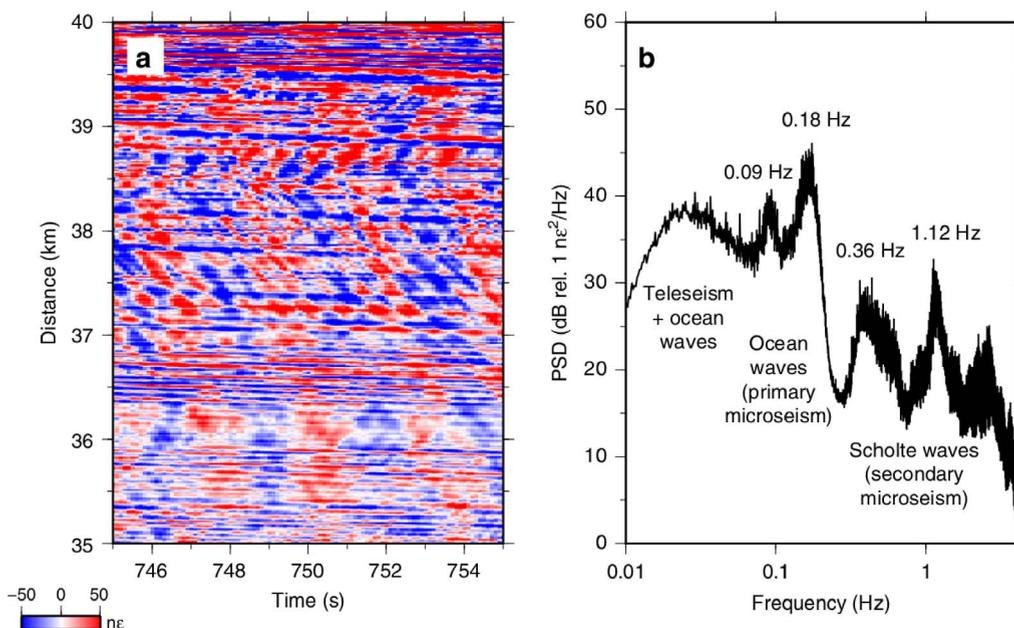
En ce qui concerne l'utilisation d'autres technologies de DFOS pour la mesure de la température, peu d'ouvrages peuvent être trouvés dans la littérature, qu'elles soient basées sur la diffusion Brillouin ou Rayleigh : ces solutions nécessitent que les fibres ne soient pas affectées par la déformation et sont principalement limitées aux modèles physiques à petite échelle [Zhu et al. 2007; Wang et al. 2016; Bersan et al. 2017; Cheng et al. 2021].

Par ailleurs, la mesure distribuée de la pression a été envisagée comme un moyen efficace de surveiller l'état d'une digue. La pression de l'eau interstitielle et la pression totales entraînent le développement de forces hydrauliques qui affectent la résistance au cisaillement du barrage, déterminant une déformation localisée dangereuse. Ces processus se produisent bien avant l'effondrement, mais peuvent conduire à une défaillance rapide car ils déterminent le mécanisme d'érosion régressive par conduits. Ces régimes de pression anormaux, s'ils sont détectés, pourraient être utilisés comme signaux précurseurs de défaillance parce qu'ils ont lieu bien avant l'apparition de la déformation, qui se produit initialement sans trace de signe avant-coureur en surface. Malheureusement, une haute résolution à la fois spatiale et de pression sont nécessaires pour atteindre cet objectif. Bien que de nombreux types de capteurs de pression à base de FBG aient été rapportés dans la littérature [Zhou et al. 2006; Wei et al. 2018; Schenato et al. 2019; Ho et al. 2021], à ce jour, il n'y a eu que quelques exemples de capteurs distribués de pression capables d'atteindre de telles performances, et ils n'ont été mis en œuvre que dans des fibres nues [Teng et al. 2016; Kim et al. 2016; Schenato et al. 2020a] au moyen de la technique de diffusion Brillouin. Récemment, il a été proposé une preuve de concept d'un câble équipé de capteurs distribués de pression, très sensibles et à haute résolution spatiale, basé sur une section de câble conçu et adapté à des applications hydrologiques [Schenato et al. 2020b]. Le câble a été conçu pour transférer efficacement la pression externe en déformation affectant la fibre intégrée, puis mesurée au moyen de la technique de diffusion Rayleigh.

### 4.3. *Système de détection acoustique distribuée*

Une autre technologie qui a fait une entrée remarquable en géophysique est la technologie de détection acoustique distribuée (DAS, distributed acoustic sensing). Le DAS s'appuie sur la détection cohérente de la rétrodiffusion Rayleigh générée par une source à bande étroite. Sous l'effet de l'illumination d'une source cohérente, l'hétérogénéité et les fluctuations de densité de la silice génèrent des signaux de rétrodiffusion cohérents qui s'additionnent vectoriellement, donnant lieu à une figure d'interférence spécifique, qui codifie la distribution spatiale de l'hétérogénéité et les phases optiques relatives correspondantes. Les variations de déformation et de température affectent et perturbent cette figure d'interférence, et par conséquent, peuvent donc être mesurées par le biais de sa variation. Plusieurs schémas optiques pour récupérer un tel motif à très grande vitesse ont été mis en œuvre, tous basés essentiellement sur la méthode dite «  $\phi$ OTDR » [Juškaitis et al. 1994; He and Liu 2021]. Cette technique permet à la fibre optique d'agir comme un réseau de géophones en phase, mesurant le champ acoustique ou vibratoire environnant avec une résolution de quelques mètres sur une portée de plusieurs kilomètres [Zhan 2020]. Contrairement à un géophone, qui enregistre le mouvement du sol (vitesse), un DAS mesure généralement le taux de déformation, et les données du DAS nécessitent une intégration spatiale appropriée pour être converties en données équivalentes à celles d'un géophone [Lior et al. 2021].

Les premières applications de la DAS en géophysique ont porté sur le profilage sismique vertical dans l'industrie pétrolière et gazière [Mestayer et al. 2011; Daley et al. 2013; Mateeva et al. 2013; Parker et al. 2014]. De nos jours, plusieurs travaux ont été publiés sur l'utilisation des DAS comme sismomètres distribués à longue portée [Lindsey et al. 2017; Jousset et al. 2018; Williams et al. 2019; Sladen et al. 2019; Lellouch et al. 2021]. Dans ces travaux, des fibres optiques noires, c'est-à-dire des fibres optiques installées mais pas encore activées, dans des câbles de télécommunications standard existants ont été sondées avec une DAS. Ces travaux ont



**FIGURE 8.** (a) Données DAS brutes (dix secondes de données de détection acoustique distribuées (DAS) brutes le long des 5 derniers km du réseau) : des signaux cohérents provenant d’ondes océaniques et sismiques se propageant à la fois vers la terre et vers la mer à travers le réseau peuvent être identifiés. (b) Moyenne de la densité spectrale de puissance (DSP) des données de déformation DAS brutes de 1 h de données dans la même position que le tracé de gauche [reproduit avec la permission de Williams et al. 2019].

montré que même des microséismes à des centaines de kilomètres peuvent être détectés avec succès [Sladen et al. 2019]. Dans Williams et al. [2019], il a été démontré que le système était capable d’enregistrer les ondes sismiques de différents types (voir Figure 8). En outre, un tremblement de terre profond d’une magnitude de 8,2 frappant les Fidji a été détecté avec un câble à fibre optique de 40 km de long au large de la Belgique.

La DAS a également été proposée pour la surveillance des glissements de terrain basée sur les vibrations en remplacement des géophones. La sensibilité du DAS est généralement moins bonne que celle des géophones par point de détection unique. Néanmoins, l’avantage de cette approche réside dans le très grand nombre de points de détection cohérents qui peuvent être sondés. Jusqu’à présent, la faisabilité de cette méthode a été testée avec un modèle physique à petite échelle d’un glissement de terrain [Michlmayr et al. 2017], et plus récemment dans un modèle physique de coulées de débris [Schenato et al. 2020c]. Dans ce dernier travail, malgré la taille plus petite du modèle (env. 2 m de long), 800 m de fibre enroulée en 20 mandrins ont été déployés, et sondés.

D’autres applications géophysiques où la surveillance sismique est d’une importance capitale sont liées aux études des fonds marins et aux tremblements de terre déclenchés par les volcans. Bien que ces études se déroulent dans des environnements complètement différents, ces applications partagent des problèmes similaires liés à l’extrême rigueur des conditions opérationnelles et à l’étendue spatiale requise de la surveillance. Initialement abordées par des réseaux massifs de FBG quasi-distribués [2010; Sorge et al. 2005], elles n’ont été abordées que récemment par la technologie DAS, avec des résultats remarquables [Williams et al. 2019; Nishimura et al. 2021; Jousset et al. 2022].

Il convient de mentionner, dans le domaine de l’environnement océanique, la surveillance de la faune des baleines à fanons dans l’Arctique à l’aide du DAS qui utilise l’infrastructure mondiale des câbles à fibre optique

de télécommunications sous-marines [Bouffaut et al. 2022].

## 5. Applications à courte portée en sciences médicales

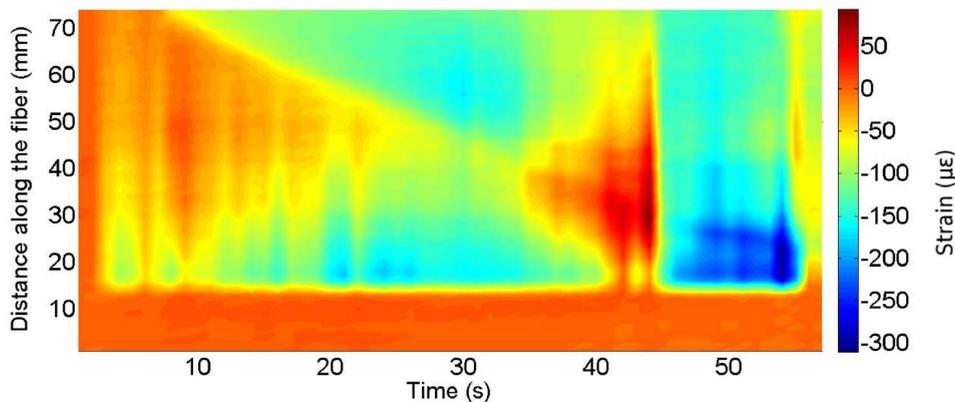
### 5.1. Capteurs de déformation distribués à fibre optique

Alors que la détection distribuée de déformation par fibre optique a trouvé sa place dans la science et la technologie modernes, montrant un grand potentiel dans les applications à longue portée, en particulier dans le domaine des applications géotechniques, celles à courte portée ont commencé à émerger au cours des dernières années. Le facteur clé qui suscite de l'intérêt en ce qui concerne la détection distribuée par fibre optique pour des applications à courte portée est la possibilité de compacter un grand nombre de points de détection dans un espace réduit, ce qui permet d'obtenir une détection inférieure au centimètre. La principale catégorie d'applications à courte distance qui peut exploiter pleinement le potentiel de la détection distribuée par fibre optique est le domaine des applications biomédicales [Tosi et al. 2018].

En ce qui concerne les applications biomédicales, il existe certains secteurs de niche qui peuvent bénéficier fortement de l'utilisation de la détection distribuée de déformation à fibre optique, principalement lorsque des mesures précises et avancées sont requises ainsi qu'une technique de détection avec une invasivité minimale [Amanzadeh et al. 2018]. Parmi ces secteurs, citons la coloscopie, l'anesthésie péridurale, les thérapies intra-artérielles, les procédures cardiaques et la chirurgie robotique ophtalmique, c'est-à-dire des applications où il peut être avantageux d'utiliser un cathéter à aiguille équipé de capteurs à fibres optiques pour la mesure de la déformation ou la reconstruction de forme [Mandal et al. 2016; Gonenc et al. 2017; Khan et al. 2019]. A cet égard, il est également nécessaire de souligner que l'utilisation de la technologie des fibres optiques est non seulement avantageuse pour la détection précise des déformations, mais présente également des avantages liés à la nature et au matériau de l'instrument de détection. En fait, la fibre optique de verre présente des propriétés particulières telles que la compacité, la robustesse, l'inertie chimique, la biocompatibilité et l'immunité à l'électromagnétisme externe, ce qui rend les capteurs à fibres optiques parfaits pour les applications biomédicales [Lee 2003].

Il convient de noter que la recherche de dispositifs biomédicaux nouveaux et innovants basés sur la technologie de détection par fibre optique s'est principalement concentrée sur l'utilisation de FBG ou de réseaux de FBG, car ils représentent une technologie mature, fiable et facilement disponible sur le marché. Dans le domaine des dispositifs médicaux qui nécessitent une mesure de la déformation pour permettre leurs fonctionnalités, l'utilisation de FBG est une bonne solution jusqu'à ce que la précision de la mesure et la concentration spatiale des points de détection deviennent une exigence obligatoire pour le système de détection. Le FBG, en effet, est un capteur à point unique et l'information sur la mesure de la déformation est limitée à sa position spatiale. L'utilisation de matrices de FBG peut améliorer la situation en promouvant le système à un dispositif de détection multipoint, cependant la technologie d'inscription de FBG limite la distance entre les éléments de la matrice à environ 1 cm. Pour certaines applications, cela ne pose pas de problème, dans la mesure où le nombre limité de points de détection ou la distance centre à centre entre les points de détection peuvent être surmontés par une analyse minutieuse des données de sortie, comme dans le cas d'un cathéter pour endoscopie du côlon dont la courbure peut être reconstruite avec une certaine précision en utilisant un ensemble de réseaux FBG [Waltermann et al. 2014]. D'autre part, d'autres applications peuvent être considérablement améliorées par l'utilisation de la détection distribuée inférieure au centimètre par fibre optique. Un cas intéressant est représenté par l'identification des limites de l'espace péridural lors de la procédure d'anesthésie péridurale.

L'anesthésie péridurale est une méthode de soulagement de la douleur très répandue, dont la principale utilisation est d'administrer un anesthésique aux femmes enceintes pendant le travail [Eltzschig et al. 2003]. La procédure consiste à atteindre l'espace péridural, un petit espace de 2–6 cm situé dans la moelle épinière entre le *ligamentum flavum* et la *dure-mère*. Le succès de cette méthode d'anesthésie dépend de l'identification correcte de l'espace péridural, qui peut être une cible difficile à atteindre. Bien que certaines méthodologies



**FIGURE 9.** Carte en couleur de la contrainte apparaissant sur une aiguille à capteur pendant l'insertion dans un fantôme au fil du temps. Le changement de contrainte indique le passage à travers les différentes couches du fantôme, qui reproduit l'anatomie de la colonne vertébrale.

manuelles ont été développées dans la pratique médicale pour améliorer la procédure d'anesthésie péridurale [Hoffmann et al. 1999], le succès de l'opération se traduit par un certain pourcentage d'échec, qui peut être quantifié à environ 10 % [Hermanides et al. 2012]. Pour améliorer le succès de l'identification de l'espace péridural et pour aider les cliniciens pendant la procédure, différentes méthodologies et outils technologiques quantitatifs ont été proposés, dont certains font appel à la technologie de détection par fibre optique. Un FBG a été inséré à l'intérieur de l'aiguille péridurale près de la pointe afin de détecter la variation de pression qui se produit lors de la pénétration de l'aiguille dans le tissu de la colonne vertébrale par Carotenuto et al. [2017]. Une approche similaire a été étudiée en équipant une aiguille utilisée pour les ponctions lombaires afin de détecter la force exercée sur le dispositif [Ambastha et al. 2016]. Ces deux solutions reposent sur l'utilisation d'un seul point de détection puisque la propriété physique à détecter est limitée à la pression/force exercée sur la pointe du dispositif. Même si le résultat scientifique est valide, une plus grande quantité de données de détection peut être récupérée en équipant l'aiguille péridurale d'un capteur à fibre optique et en utilisant une approche distribuée. Sur la base de cette idée, Beisenova et al. [2018] ont collé de manière longitudinale une fibre SMF-28 le long d'une aiguille péridurale et ont mesuré la déformation distribuée se produisant lors de la pénétration de l'aiguille dans un fantôme fait sur mesure. La mesure de la déformation distribuée obtenue à l'aide d'un interrogateur Luna OBR. La carte de déformation typique est illustrée sur la figure 9. Sur la figure, il est possible de distinguer le changement de contrainte associé au passage dans les différentes couches du fantôme, représentant l'anatomie de la colonne vertébrale. Le fait que la totalité de la mesure de la déformation le long de l'aiguille soit détectée permet, en principe, d'obtenir une plus grande quantité d'informations. Par conséquent, un comportement plus précis de l'aiguille peut être reconstruit, y compris : la rotation, le désalignement et le déplacement. De plus, cette approche introduit une perspective plus complète de mesure distribuée de la déformation, qui implique la reconstruction 3D des formes détectées par le dispositif médical, pour suivre la direction de l'aiguille lors de l'insertion.

## 5.2. Détection des formes 3D pour application médicale

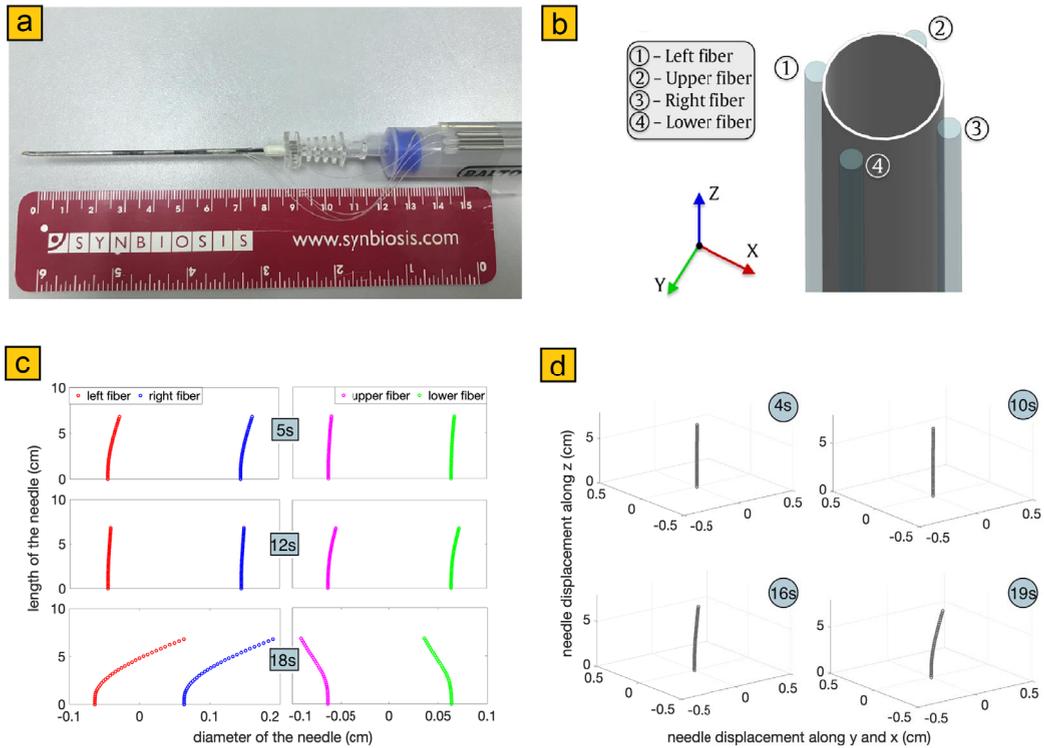
L'impact de la détection des formes, pour les applications industrielles et médicales, a suscité un intérêt considérable de la part de la communauté scientifique au cours de la dernière décennie [Waltermann et al. 2015]. Il ne fait aucun doute que les capteurs de forme basés sur la technologie des fibres optiques, principalement dans le contexte des applications biomédicales de précision, présentent des avantages par rapport

aux capteurs de forme basés sur la technologie électronique [Amanzadeh et al. 2018]. La petite taille des capteurs basés sur la technologie de la fibre optique est intrinsèquement associée à la possibilité d'avoir à la fois une configuration de détection multipoint ou distribuée; la première utilise la technologie FBG, la seconde exploite la rétrodiffusion naturelle, se produisant dans la fibre, et la stratégie de détection OFDR.

Le problème de la détection des formes, obtenu en utilisant la technologie des fibres, peut être traduit par le problème de la détection de la courbure et de la direction de courbure de la fibre. Pour mesurer la courbure, deux approches différentes sont proposées dans la littérature : la première consiste à mesurer le changement d'intensité optique dans une fibre multicœurs, la seconde consiste à détecter la déformation induite par la courbure de la fibre. La dernière stratégie de détection est devenue prédominante, principalement en raison de la maturité de la technologie FBG, qui offre une plate-forme de détection cohérente et fiable. Néanmoins, il est bien connu qu'un FBG offre une mesure en un seul point, de sorte que pour cibler une détection de forme complète, nous devons équiper le dispositif de multiples fibres sur lesquelles sont inscrits des réseaux de FBG [Roesthuis et al. 2014]. Une autre possibilité repose sur l'utilisation de fibres multicœurs munies de FBG inscrits [Flockhart et al. 2003]. La disposition géométrique des fibres, utilisées pour équiper le dispositif, dépend strictement de la géométrie de l'objet dont on veut détecter la forme. Dans le cas d'un objet en forme de tige, qui est une géométrie courante pour les dispositifs médicaux tels que les cathéters et les aiguilles, une mesure de la forme complète en 3D peut être réalisée en utilisant trois fibres optiques (ou une fibre à trois cœurs) disposées en forme de triangle [Waltermann et al. 2014]. En tordant les fibres optiques, il est également possible de détecter la torsion de l'aiguille [Askins et al. 2008], alors qu'en ajoutant une quatrième fibre optique il est possible de compenser la température [Beisenova et al. 2019a]. Des fibres présentant de multiples cœurs, dont le nombre est supérieur à quatre, peuvent être utilisées pour exécuter des algorithmes avancés de reconstruction de forme afin d'améliorer la précision [Floris et al. 2019].

Comme mentionné précédemment, l'utilisation de capteurs à fibres optiques multipoints peut montrer ses limites dans le cas d'applications biomédicales précises et critiques. Dans ce cas, un plus grand nombre de points de détection, situés dans le sens longitudinale du dispositif est nécessaire. La détection de contrainte distribuée est la solution pour augmenter la précision des capteurs de forme [Bao et Chen 2012]. Cependant, pour réaliser la détection des formes sur un outil médical, tel qu'une aiguille ou un cathéter, il est nécessaire de fournir à l'outil un certain nombre de fibres optiques, trois ou quatre selon les configurations standard proposées dans la littérature. Cela représente en principe un problème puisque les systèmes de détection tel que l'OBR ne peuvent être alimentés qu'avec les données d'un seul capteur à fibre optique. Des fibres optiques parallèles, utilisées pour alimenter l'OBR, entraîneront un chevauchement incohérent de la rétrodiffusion provenant de chaque fibre, rendant impossible la détection de la déformation et de son emplacement dans l'espace. Beisenova et al. ont résolu ce problème, apparemment épineux, en utilisant une fibre optique à haute diffusion dopée aux nanoparticules avec un protocole opératoire appelé SLMux [Beisenova et al. 2019b]. La forte rétrodiffusion est générée par la présence de nanoparticules à base de MgO situées dans le cœur de la fibre [Blanc et al. 2011]. En exploitant la forte diffusion, il est possible de disposer des fibres optiques parallèles, de sorte que la fibre à forte diffusion ne se chevauche qu'avec des pigtaills SMF à faible diffusion. Étant donné que le niveau de diffusion de la fibre à nanoparticules à base de MgO est supérieur de 30 à 40 dB à la diffusion normale de la fibre, la diffusion SMF-28 peut être traitée comme du bruit.

Beisenova et al. ont exploité la nouvelle capacité SLMux pour démontrer la détection de forme 3D d'une aiguille péridurale [Beisenova et al. 2019a]. Comme le montre la figure 10(a), quatre segments de fibres optiques dopées aux nanoparticules ont été collées longitudinalement sur une aiguille péridurale, reliée à l'OBR par la configuration SLMux. Les fibres optiques ont été agencées en angle droit autour de l'aiguille, de sorte que chaque couple de fibres opposées mesure la contrainte le long de l'un des axes de coordonnées, comme le montre la figure 10(b). Compter deux fibres pour chaque axe permet d'améliorer la précision de la mesure de la déformation. Par ailleurs, étant donné que la détection de forme 3D nécessite trois fibres optiques pour être entièrement déterminé, la présence d'une quatrième fibre optique permet de discriminer le décalage provoqué par l'effet uniforme de la température sur les quatre fibres. La déformation sur les capteurs à fibres optiques a été détectée avec une résolution de 2 mm par l'OBR. Les informations de déformation ont été converties en



**FIGURE 10.** Aiguille péridurale équipée d'un capteur avec quatre fibres optiques parallèles, exploitant SLMux (a); schéma des fibres optiques fixées sur l'aiguille et formant un angle de  $90^\circ$  (b); courbure améliorée reconstruite en mesurant la déformation de chaque fibre optique le long de l'axe  $z$  à différents moments (c); courbure correspondante de l'aiguille reconstruite en 3D à différents moments (d).

données de courbure par un algorithme simple. Plusieurs insertions dans un fantôme fait sur mesure ont été effectuées pour valider le modèle de détection de forme 3D. Un exemple de reconstruction 3D est présenté sur la figure 10(c, d). Comme il est possible de le remarquer, le système est capable de détecter un angle de courbure minimal, permettant une reconstruction de forme ultra-précise, impossible pour les systèmes basés sur les FBG. Ce nouveau paradigme de détection de déformation distribuée peut potentiellement ouvrir de nouvelles frontières dans des applications biomédicales critiques telles que la chirurgie ophthalmique.

## 6. Conclusion

Grâce à ses caractéristiques (petite taille, insensible aux interférences électromagnétiques, passive, résistante aux environnements difficiles, etc.), la fibre optique est devenue au cours des dernières décennies une technologie de choix pour la fabrication de capteurs. De plus, sa capacité à être sensible sur des longueurs allant du centimètre à plus de 100 km permet de produire des capteurs distribués pour des domaines aussi divers que la géologie ou la médecine.

Dans le contexte de la géologie, la détection exploite principalement la diffusion Brillouin pour détecter la déformation et la diffusion Raman pour les mesures de température. Pour surveiller les processus géomorphologiques tels que les glissements de terrain, les DFOS sont enfouis dans des tranchées peu profondes ou simplement ancrés au sol. Une carte détaillée du champ de déformation dans la zone surveillée peut être obtenue grâce à la capacité des fibres optiques à être disposées dans une grille carrée. Le profil de déformation verticale

peut être détecté en installant le DFOS dans un trou de forage. Ces DFOS présentent également un intérêt pour surveiller l'état des berges et des ancrages au sol. Couplée à une technique basée sur la diffusion Raman, la mesure distribuée de la température peut être effectuée pour détecter un flux de filtration précoce. Basé sur la détection cohérente de la rétrodiffusion Rayleigh, la détection acoustique distribuée est une technologie supplémentaire pour mesurer le champ acoustique ou vibratoire. Les sismomètres sismiques distribués à longue portée et les moniteurs de glissement de terrain sont basés sur cette technologie.

Pour les applications reposant sur les DFOS à courte portée, la détection de la déformation et de la température est principalement basée sur la technologie FBG et la rétrodiffusion Rayleigh. En raison de sa petite taille (donc de son invasivité minimale) et de sa biocompatibilité, le DFOS à courte portée présente un intérêt pour les applications biomédicales. Par exemple, les fibres optiques collées autour d'une aiguille permettent de surveiller la déformation pour reconstituer sa forme lors de l'insertion. Ce type de DFOS peut être basé sur une fibre optique multicœurs ou sur des FBG photo-inscrits dans le cœur de la fibre. Récemment, l'utilisation de fibres optiques à forte diffusion dopées aux nanoparticules a favorisé l'émergence un nouveau protocole (SLMux) pour mesurer simultanément les informations provenant de plusieurs fibres optiques avec un grand nombre de points de détection.

Les DFOS ont trouvé une place dans la science et la technologie modernes, montrant un grand potentiel dans les applications à longue portée, en particulier dans le domaine de la géophysique. Les applications à courte distance, apparues ces dernières années, se situent dans des secteurs de niche. Le nouveau paradigme de détection distribuée des déformations (SLMux) peut potentiellement ouvrir de nouvelles frontières dans des applications biomédicales critiques.

## 7. Conflits d'intérêts

Les auteurs ne déclarent aucun intérêt financier concurrent.

## 8. Dédicace

Le manuscrit a été rédigé grâce aux contributions de tous les auteurs. Tous les auteurs ont donné leur accord à la version finale du manuscrit.

## 9. Remerciements

Les auteurs remercient Martiane Cabie (CP2M, Marseille, France) pour les images MEB. Ce travail a été en partie financé par le projet ANR NanoSlim (ANR-17-CE08-0002), et par l'Université Nazarbayev, dans le cadre de subventions EPICGuide (code : 240919FD3908) et SMARTER (code : 091019CRP2117).

## Références

- Albalat, C. and Garnero, E. (1995). Mesure de fuites sur le canal de jonage avec un capteur de température à fibre optique continûment sensible. Technical Report EDF-D4007/23/GC/95-3018, Électricité de France S.A.
- Amanzadeh, M., Aminossadati, S. M., Kizil, M. S., and Rakić, A. D. (2018). Recent developments in fibre optic shape sensing. *Measurement*, 128, 119–137.
- Ambastha, S., Umesh, S., Dabir, S., and Asokan, S. (2016). Spinal needle force monitoring during lumbar puncture using fiber bragg grating force device. *J. Biomed. Opt.*, 21(11), article no. 117002.
- Artières, O., Beck, Y.-L., Guidoux, C., Pinettes, P., and Fry, J.-J. (2010). Monitoring of earthdams leaks and stability with fibre-optics based monitoring system. In *Proceedings of the 8th ICOLD European Club Symposium 2010, Innsbruck, Austria, 22–23 September 2010*, pages 432–437.

- Askins, C., Putnam, M., Williams, G., and Friebele, E. (1994). Stepped-wavelength optical-fiber bragg grating arrays fabricated in line on a draw tower. *Opt. Lett.*, 19(2), 147–149.
- Askins, C. G., Miller, G. A., and Friebele, E. J. (2008). Bend and twist sensing in a multiple-core optical fiber. In *OFC/NFOEC 2008—2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3.
- Aufleger, M., Dornstädter, J., Huber, K., and Strobl, T. (1997). Internal erosion and surveillance. In *19th ICOLD Congress*, volume q74-14, pages 443–446.
- Babinet, J. (1842). Note sur la transmission de la lumière par des canaux sinueux. *Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, 15, 802.
- Bao, X. and Chen, L. (2012). Recent progress in distributed fiber optic sensors. *Sensors*, 12(7), 8601–8639.
- Beisenova, A., Issatayeva, A., Iordachita, I., Blanc, W., Molardi, C., and Tosi, D. (2019a). Distributed fiber optics 3d shape sensing by means of high scattering np-doped fibers simultaneous spatial multiplexing. *Opt. Express*, 27(16), 22074–22087.
- Beisenova, A., Issatayeva, A., Korganbayev, S., Molardi, C., Blanc, W., and Tosi, D. (2019b). Simultaneous distributed sensing on multiple MGO-doped high scattering fibers by means of scattering-level multiplexing. *J. Light. Technol.*, 37(13), 3413–3421.
- Beisenova, A., Issatayeva, A., Tosi, D., and Molardi, C. (2018). Fiber-optic distributed strain sensing needle for real-time guidance in epidural anesthesia. *IEEE Sens. J.*, 18(19), 8034–8044.
- Bersan, S., Bergamo, O., Palmieri, L., Schenato, L., and Simonini, P. (2018). Distributed strain measurements in a CFA pile using high spatial resolution fibre optic sensors. *Eng. Struct.*, 160, 554–565.
- Bersan, S., Koelewijn, A. R., Putti, M., and Simonini, P. (2019). Large-scale testing of distributed temperature sensing for early detection of piping. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 145(9), article no. 04019052.
- Bersan, S., Schenato, L., Rajendran, A., Palmieri, L., Cola, S., Pasuto, A., and Simonini, P. (2017). Application of a high resolution distributed temperature sensor in a physical model reproducing subsurface water flow. *Measurement*, 98, 321–324.
- Blanc, W., Lu, Z., Vermillac, M., Fourmont, J., Martin, I., Saint-Cyr, H. F., Molardi, C., Tosi, D., Piarresteguy, A., Mady, F., Benabdesselam, M., Pigeonneau, F., Chaussedent, S., and Guillermier, C. (2020). Reconsidering nanoparticles in optical fibers. In *Optical Components and Materials XVII*, volume 11276, page 112760S. International Society for Optics and Photonics, Bellingham, Washington, USA.
- Blanc, W., Martin, I., Francois-Saint-Cyr, H., Bidault, X., Chaussedent, S., Hombourger, C., Lacomme, S., Le Coustumer, P., Neuville, D. R., Larson, D. J., Prosa, T. J., and Guillermier, C. (2019). Compositional changes at the early stages of nanoparticles growth in glasses. *J. Phys. Chem. C*, 123(47), 29008–29014.
- Blanc, W., Mauroy, V., Nguyen, L., Shivakiran Bhaktha, B., Sebbah, P., Pal, B. P., and Dussardier, B. (2011). Fabrication of rare earth-doped transparent glass ceramic optical fibers by modified chemical vapor deposition. *J. Am. Ceram. Soc.*, 94(8), 2315–2318.
- Bouffaut, L., Taweasantanon, K., Kriesell, H. J., Rørstadbotnen, R. A., Potter, J. R., Landrø, M., Johansen, S. E., Brenne, J. K., Haukanes, A., Schjelderup, O., and Storvik, F. (2022). Eavesdropping at the speed of light : distributed acoustic sensing of baleen whales in the arctic. *EarthArXiv*.
- Bulot, P., Bernard, R., Cieslikiewicz-Bouet, M., Laffont, G., and Douay, M. (2021). Performance study of a zirconia-doped fiber for distributed temperature sensing by OFDR at 800 °C. *Sensors*, 21(11), article no. 3788.
- Canning, J., Bandyopadhyay, S., Biswas, P., Aslund, M., Stevenson, M., and Cook, K. (2010). Regenerated fibre bragg gratings. In Pal, B., editor, *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*. IntechOpen, Rijeka. Ch. 18.
- Canning, J., Stevenson, M., Bandyopadhyay, S., and Cook, K. (2008). Extreme silica optical fibre gratings. *Sensors*, 8(10), 6448–6452.
- Carotenuto, B., Micco, A., Ricciardi, A., Amorizzo, E., Mercieri, M., Cutolo, A., and Cusano, A. (2017). Optical guidance systems for epidural space identification. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 23(2), 371–379.
- Cheng, L., Zhang, A., Cao, B., Yang, J., Hu, L., and Li, Y. (2021). An experimental study on monitoring the phreatic line of an embankment dam based on temperature detection by OFDR. *Opt. Fiber Technol.*, 63,

- article no. 102510.
- Cola, S., Girardi, V., Bersan, S., Simonini, P., Schenato, L., and De Polo, F. (2021). An optical fiber-based monitoring system to study the seepage flow below the landside toe of a river levee. *J. Civ. Struct. Health Monit.*, 11, 691–705.
- Cola, S., Schenato, L., Brezzi, L., Tchamaleu Pangop, F. C., Palmieri, L., and Bisson, A. (2019). Composite anchors for slope stabilisation : Monitoring of their in-situ behaviour with optical fibre. *Geosciences*, 9(5), article no. 240.
- Colladon, D. (1842). Sur les réflexions d'un rayon de lumière à l'intérieur d'une veine liquide parabolique. *Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, 15(1800), 800–802.
- Coscetta, A., Minardo, A., and Zeni, L. (2020). Distributed dynamic strain sensing based on brillouin scattering in optical fibers. *Sensors*, 20(19), article no. 5629.
- Culshaw, B. and Kersey, A. (2008). Fiber-optic sensing : A historical perspective. *J. Light. Technol.*, 26(9), 1064–1078.
- Daley, T. M., Freifeld, B. M., Ajo-Franklin, J., Dou, S., Pevzner, R., Shulakova, V., Kashikar, S., Miller, D. E., Goetz, J., Hennings, J., and Lueth, S. (2013). Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring. *Lead. Edge*, 32(6), 699–706.
- Damiano, E., Avolio, B., Minardo, A., Olivares, L., Picarelli, L., and Zeni, L. (2017). A laboratory study on the use of optical fibers for early detection of pre-failure slope movements in shallow granular soil deposits. *Geotech. Test. J.*, 40(4), 529–541.
- Darban, R., Damiano, E., Minardo, A., Olivares, L., Picarelli, L., and Zeni, L. (2019). An experimental investigation on the progressive failure of unsaturated granular slopes. *Geosciences*, 9(2), article no. 63.
- Denisov, A., Soto, M. A., and Thévenaz, L. (2016). Going beyond 1000,000 resolved points in a brillouin distributed fiber sensor : theoretical analysis and experimental demonstration. *Light Sci. Appl.*, 5(5), e16074–e16074.
- Donko, A., Sandoghchi, R., Masoudi, A., Beresna, M., and Brambilla, G. (2018). Low-loss micro-machined fiber with Rayleigh backscattering enhanced by two orders of magnitude. In *Optical Fiber Sensors*, page WF75. Optical Society of America, Washington, DC, USA.
- Eickhoff, W. and Ulrich, R. (1981). Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber. *Appl. Phys. Lett.*, 39(9), 693–695.
- Eltzschig, H., Lieberman, E., and Camann, W. (2003). Regional anesthesia and analgesia for labor and delivery. *New England J. Med.*, 348(4), 319–332.
- Farahani, M. A. and Gogolla, T. (1999). Spontaneous raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature raman remote sensing. *J. Light. Technol.*, 17(8), 1379–1391.
- Fenta, M. C., Potter, D. K., and Szanyi, J. (2021). Fibre optic methods of prospecting : a comprehensive and modern branch of geophysics. *Surv. Geophys.*, 42(3), 551–584.
- Flockhart, G., MacPherson, W., Barton, J., Jones, J., Zhang, L., and Bennion, I. (2003). Two-axis bend measurement with bragg gratings in multicore optical fiber. *Opt. Lett.*, 28(6), 387–389.
- Floris, I., Sales, S., Calderón, P. A., and Adam, J. M. (2019). Measurement uncertainty of multicore optical fiber sensors used to sense curvature and bending direction. *Measurement*, 132, 35–46.
- Froggatt, M. and Moore, J. (1998). High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter. *Appl. Opt.*, 37(10), 1735–1740.
- Fry, J.-J. (1997). Internal erosion and surveillance. In *19th ICOLD Congress*, volume V, pages 255–268.
- Gonenc, B., Chae, J., Gehlbach, P., Taylor, R., and Iordachita, I. (2017). Towards robot-assisted retinal vein cannulation : A motorized force-sensing microneedle integrated with a handheld micromanipulator. *Sensors*, 17(10), article no. 2195.
- Götten, M., Lochmann, S., Ahrens, A., Lindner, E., Vlekken, J., and Van Roosbroeck, J. (2020). 4000 serial FBG sensors interrogated with a hybrid CDM-WDM system. In *2020 IEEE SENSORS*, pages 1–4.
- Guo, H., Liu, F., Yuan, Y., Yu, H., and Yang, M. (2015). Ultra-weak FBG and its refractive index distribution in the drawing optical fiber. *Opt. Express*, 23(4), 4829–4838.

- Habel, J., Boilard, T., Frenière, J.-S., Trépanier, F., and Bernier, M. (2017). Femtosecond FBG written through the coating for sensing applications. *Sensors*, 17(11), article no. 2519.
- Hasegawa, T., Tamura, Y., Sakuma, H., Kawaguchi, Y., Yamamoto, Y., and Koyano, Y. (2018). The first 0.14-dB/km ultra-low loss optical fiber. *SEI Tech. Rev.*, 86, 18–22.
- He, Z. and Liu, Q. (2021). Optical fiber distributed acoustic sensors : a review. *J. Light. Technol.*, 39(12), 3671–3686.
- Hermanides, J., Hollmann, M., Stevens, M., and Lirk, P. (2012). Failed epidural : Causes and management. *Br. J. Anaesth.*, 109(2), 144–154.
- Ho, Y.-T., Wang, Y.-L., Chang, L.-C., Wang, T.-P., and Tsai, J.-P. (2021). Optical system for monitoring groundwater pressure and temperature using fiber bragg gratings. *Opt. Express*, 29(11), 16032–16045.
- Hoepffner, R., Singer, J., Thuro, K., and Aufleger, M. (2008). Development of an integral system for dam and landslide monitoring based on distributed fibre optic technology. In *Ensuring Reservoir Safety into the Future : Proceedings of the 15th Conference of the British Dam Society at the University of Warwick from 10–13 September 2008*, pages 177–189. Thomas Telford Publishing.
- Hoffmann, V., Vercauteren, M., Vreugde, J.-P., Hans, G., Coppejans, H., and Adriaensen, H. (1999). Posterior epidural space depth : Safety of the loss of resistance and hanging drop techniques. *Br. J. Anaesth.*, 83(5), 807–809.
- Huang, X., Wang, Y., Sun, Y., Zhang, Q., Zhang, Z., You, Z., and Ma, Y. (2018). Research on horizontal displacement monitoring of deep soil based on a distributed optical fibre sensor. *J. Mod. Opt.*, 65(2), 158–165.
- Inaudi, D. and Glisic, B. (2010). Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing. *J. Press. Vessel Technol.*, 132(1), article no. 011701.
- Iten, M., Ravet, F., Niklès, M., Facchini, M., Hertig, T. H., Hauswirth, D., and Puzrin, A. (2009). Soil-embedded fiber optic strain sensors for detection of differential soil displacements. In *Proceedings of 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4)*, pages 22–24.
- Johansson, S. and Sjö Dahl, P. (2004). Downstream seepage detection using temperature measurements and visual inspection—Monitoring experiences from Røsvatn field test dam and large embankment dams in Sweden. In *Proceedings of International Seminar on Stability and Breaching of Embankment Dams*, page 21.
- Jousset, P., Currenti, G., Schwarz, B., Chalari, A., Tilmann, F., Reinsch, T., Zuccarello, L., Privitera, E., and Krawczyk, C. M. (2022). Fibre optic distributed acoustic sensing of volcanic events. *Nat. Commun.*, 13(1), 1–16.
- Jousset, P., Reinsch, T., Ryberg, T., Blanck, H., Clarke, A., Aghayev, R., Hersir, G. P., Hennings, J., Weber, M., and Krawczyk, C. M. (2018). Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features. *Nat. Commun.*, 9(1), article no. 2509.
- Juškaitis, R., Mamedov, A., Potapov, V., and Shatalin, S. (1994). Interferometry with Rayleigh backscattering in a single-mode optical fiber. *Opt. Lett.*, 19(3), 225–227.
- Kao, K. C. and Hockham, G. A. (1966). Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, volume 113, pages 1151–1158. IET.
- Kashyap, R. (2009). *Fiber Bragg Gratings*. Academic Press, Amsterdam, Netherlands.
- Kersey, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., LeBlanc, M., Koo, K., Askins, C., Putnam, M., and Friebele, E. J. (1997). Fiber grating sensors. *J. Light. Technol.*, 15(8), 1442–1463.
- Khan, F., Denasi, A., Barrera, D., Madrigal, J., Sales, S., and Misra, S. (2019). Multi-core optical fibers with bragg gratings as shape sensor for flexible medical instruments. *IEEE Sens. J.*, 19(14), 5878–5884.
- Kim, Y. H., Kwon, H., Kim, J., and Song, K. Y. (2016). Distributed measurement of hydrostatic pressure based on Brillouin dynamic grating in polarization maintaining fibers. *Opt. Express*, 24(19), 21399–21406.
- Koester, C. J. and Snitzer, E. (1964). Amplification in a fiber laser. *Appl. Opt.*, 3(10), 1182–1186.
- Kogure, T. and Okuda, Y. (2018). Monitoring the vertical distribution of rainfall-induced strain changes in a landslide measured by distributed fiber optic sensing with Rayleigh backscattering. *Geophys. Res. Lett.*, 45(9), 4033–4040.
- Kringlebotn, J. T. (2010). Large scale fibre optic bragg-grating based ocean bottom seismic cable system for

- permanent reservoir monitoring. In *Optical Sensors*, page SWA1. Optical Society of America, Washington, DC, USA.
- Kumari, C. U., Samiappan, D. R. K., and Sudhakar, T. (2019). Fiber optic sensors in ocean observation : A comprehensive review. *Optik*, 179, 351–360.
- Lee, B. (2003). Review of the present status of optical fiber sensors. *Opt. Fiber Technol.*, 9(2), 57–79.
- Lei, H., Zhu, P. Y., Liang, H. Q., and Hou, G. Q. (2012). Experimental research of distributed optical fiber sensor monitors the embankment hidden hazard. In *Applied Mechanics and Materials*, volume 226, pages 2132–2136. Trans Tech Publications, Baech, Switzerland.
- Lellouch, A., Biondi, E., Biondi, B. L., Luo, B., Jin, G., and Meadows, M. A. (2021). Properties of a deep seismic waveguide measured with an optical fiber. *Phys. Rev. Res.*, 3(1), article no. 013164.
- Lenke, P., Wendt, M., Krebber, K., and Glötzl, R. (2011). Highly sensitive fiber optic inclinometer : easy to transport and easy to install. In *21st International Conference on Optical Fiber Sensors*, volume 7753. International Society for Optics and Photonics.
- Li, T. (2012). *Optical Fiber Communications : Fiber Fabrication*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Li, W., Bao, X., Li, Y., and Chen, L. (2008a). Differential pulse-width pair botda for high spatial resolution sensing. *Opt. Express*, 16(26), 21616–21625.
- Li, Y., Liao, C., Wang, D., Sun, T., and Grattan, K. (2008b). Study of spectral and annealing properties of fiber bragg gratings written in h 2-free and h 2-loaded fibers by use of femtosecond laser pulses. *Opt. Express*, 16(26), 21239–21247.
- Linder, E., Chojetski, C., Brueckner, S., Becker, M., Rothhardt, M., and Bartelt, H. (2009). Thermal regeneration of fibre bragg gratings in photosensitive fibres. *Opt. Express*, 17, 12523–12531.
- Lindsey, N. J., Martin, E. R., Dreger, D. S., Freifeld, B., Cole, S., James, S. R., Biondi, B. L., and Ajo-Franklin, J. B. (2017). Fiber-optic network observations of earthquake wavefields : fiber-optic earthquake observations. *Geophys. Res. Lett.*, 44(23), 11792–11799.
- Lior, I., Sladen, A., Mercerat, D., Ampuero, J.-P., Rivet, D., and Sambolian, S. (2021). Strain to ground motion conversion of DAS data for earthquake magnitude and stress drop determination. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, pages EGU21–7601. European Geosciences Union.
- Luo, M., Liu, J., Tang, C., Wang, X., Lan, T., and Kan, B. (2019). 0.5 mm spatial resolution distributed fiber temperature and strain sensor with position-deviation compensation based on OFDR. *Opt. Express*, 27(24), 35823–35829.
- Mandal, K., Parent, F., Martel, S., Kashyap, R., and Kadoury, S. (2016). Vessel-based registration of an optical shape sensing catheter for mr navigation. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, 11(6), 1025–1034.
- Mateeua, A., Lopez, J., Mestayer, J., Wills, P., Cox, B., Kiyashchenko, D., Yang, Z., Berlang, W., Detomo, R., and Grandi, S. (2013). Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with VSP. *Lead. Edge*, 32(10), 1278–1283.
- Mestayer, J., Cox, B., Wills, P., Kiyashchenko, D., Lopez, J., Costello, M., Bourne, S., Ugueto, G., Lupton, R., Solano, G., Hill, D., and Lewis, A. (2011). Field trials of distributed acoustic sensing for geophysical monitoring. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011*, pages 4253–4257. Society of Exploration Geophysicists.
- Michlmayr, G., Chalari, A., Clarke, A., and Or, D. (2017). Fiber-optic high-resolution acoustic emission (AE) monitoring of slope failure. *Landslides*, 14(3), 1139–1146.
- Mihailov, S. J. (2012). Fiber bragg grating sensors for harsh environments. *Sensors*, 12(2), 1898–1918.
- Miliou, A. (2021). In-fiber interferometric-based sensors : Overview and recent advances. In *Photonics*, volume 8, page 265. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, Switzerland.
- Minardo, A., Picarelli, L., Avolio, B., Coscetta, A., Papa, R., Zeni, G., Di Maio, C., Vassallo, R., and Zeni, L. (2014). Fiber optic based inclinometer for remote monitoring of landslides : on site comparison with traditional inclinometers. In *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pages 4078–4081. IEEE.
- Minutolo, V., Cerri, E., Coscetta, A., Damiano, E., De Cristofaro, M., Di Gennaro, L., Esposito, L., Ferla, P., Mirabile, M., Olivares, L., and Zona, R. (2020). Nsht : New smart hybrid transducer for structural and geotechnical applications. *Appl. Sci.*, 10(13), article no. 4498.

- Monet, F., Loranger, S., Lambin-Iezzi, V., Drouin, A., Kadoury, S., and Kashyap, R. (2019). The rogue : a novel, noise-generated random grating. *Opt. Express*, 27(10), 13895–13909.
- Naruse, H., Uchiyama, Y., Kurashima, T., and Unno, S. (2000). River levee change detection using distributed fiber optic strain sensor. *IEICE Trans. Electron.*, 83(3), 462–467.
- Nishimura, T., Emoto, K., Nakahara, H., Miura, S., Yamamoto, M., Sugimura, S., Ishikawa, A., and Kimura, T. (2021). Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acoustic sensing system. *Sci. Rep.*, 11(1), 1–12.
- Nöther, N., Wosniok, A., Krebber, K., and Thiele, E. (2008). A distributed fiber optic sensor system for dike monitoring using brillouin optical frequency domain analysis. In *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems 2008*, volume 6933, page 69330T. International Society for Optics and Photonics, Bellingham, Washington, USA.
- Palmieri, L. and Schenato, L. (2013). Distributed optical fiber sensing based on Rayleigh scattering. *Open Opt. J.*, 7(1), 104–127.
- Papini, M., Ivanov, V. I., Brambilla, D., Ferrario, M., Brunero, M., Cazzulani, G., and Longoni, L. (2020). First steps for the development of an optical fibre strain sensor for shallow landslide stability monitoring through laboratory experiments. In *Applied Geology*, pages 197–208. Springer, Cham, Switzerland.
- Parent, F., Gérard, M., Monet, F., Loranger, S., Soulez, G., Kashyap, R., and Kadoury, S. (2018). Intra-arterial image guidance with optical frequency domain reflectometry shape sensing. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 38(2), 482–492.
- Parker, T., Shatalin, S., and Farhadiroushan, M. (2014). Distributed Acoustic Sensing—a new tool for seismic applications. *First Break*, 32(2), 61–69.
- Pelecanos, L., Soga, K., Elshafie, M. Z., de Battista, N., Kechavarzi, C., Gue, C. Y., Ouyang, Y., and Seo, H.-J. (2018). Distributed fiber optic sensing of axially loaded bored piles. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 144(3), article no. 04017122.
- Perzлмаier, S., Aufleger, M., and Conrad, M. (2004). Distributed fiber optic temperature measurements in hydraulic engineering : Prospects of the heat-up method. In *Proceedings of the 72nd ICOLD Annual Meeting*, volume 16, page 22.
- Polz, L., Dutz, F. J., Maier, R. R., Bartelt, H., and Roths, J. (2021). Regenerated fibre bragg gratings : A critical assessment of more than 20 years of investigations. *Opt. Laser Technol.*, 134, article no. 106650.
- Pyayt, A. L., Kozionov, A. P., Mokhov, I. I., Lang, B., Meijer, R. J., Krzhizhanovskaya, V. V., and Sloot, P. M. A. (2014). Time-frequency methods for structural health monitoring. *Sensors*, 14(3), 5147–5173.
- Reupert, A., Heck, M., Nolte, S., and Wondraczek, L. (2019). Side-emission properties of femtosecond laser induced scattering centers in optical fibers. *Opt. Mater. Express*, 9(6), 2497–2510.
- Roesthuis, R., Kemp, M., Van Den Dobbelssteen, J., and Misra, S. (2014). Three-dimensional needle shape reconstruction using an array of fiber bragg grating sensors. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 19(4), 1115–1126.
- Sang, H., Zhang, D., Gao, Y., Zhang, L., Wang, G., Shi, B., Zheng, B., and Liu, Y. (2019). Strain distribution based geometric models for characterizing the deformation of a sliding zone. *Eng. Geol.*, 263, article no. 105300.
- Sayde, C., Gregory, C., Gil-Rodriguez, M., Tufillaro, N., Tyler, S., van de Giesen, N., English, M., Cuenca, R., and Selker, J. S. (2010). Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics. *Water Resour. Res.*, 46(6), article no. W06201.
- Schenato, L. (2017). A review of distributed fibre optic sensors for geo-hydrological applications. *Appl. Sci.*, 7(9), article no. 896.
- Schenato, L., Galtarossa, A., Pasuto, A., and Palmieri, L. (2020a). Distributed optical fiber pressure sensors. *Opt. Fiber Technol.*, 58, article no. 102239.
- Schenato, L., Palmieri, L., Camporese, M., Bersan, S., Cola, S., Pasuto, A., Galtarossa, A., Salandin, P., and Simonini, P. (2017). Distributed optical fibre sensing for early detection of shallow landslides triggering. *Sci. Rep.*, 7(1), 1–7.
- Schenato, L., Pasuto, A., Galtarossa, A., and Palmieri, L. (2020b). An optical fiber distributed pressure sensing cable with Pa-sensitivity and enhanced spatial resolution. *IEEE Sens. J.*, 20(11), 5900–5908.

- Schenato, L., Rong, Q., Shao, Z., Quiao, X., Pasuto, A., Galtarossa, A., and Palmieri, L. (2019). Highly sensitive FBG pressure sensor based on a 3d-printed transducer. *J. Light. Technol.*, 37(18), 4784–4790.
- Schenato, L., Tecca, P., Deganutti, A., Martins, H., Ruiz, A., Fernández-Ruiz, M. d. R., Martin-Lopez, S., Zarattini, F., Pol, A., Gabrieli, F., Galtarossa, A., Pasuto, A., Gonzalez-Herraez, M., and Palmieri, L. (2020c). Distributed acoustic sensing of debris flows in a physical model. In *Optical Fiber Sensors*, pages Th4–27. Optical Society of America, Washington, DC, USA.
- Shanafield, M., Banks, E., Arkwright, J., and Hausner, M. (2018). Fiber-optic sensing for environmental applications : Where we have come from and what is possible. *Water Resour. Res.*, 54(11), 8552–8557.
- Shi, B., Sui, H., Zhang, D., Wang, B., Wei, G., and Piao, C. (2008). Distributive monitoring of the slope engineering. In *Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, pages 1283–1288.
- Shi, B., Zhang, D., Zhu, H., Zhang, C., Gu, K., Sang, H., Han, H., Sun, M., and Liu, J. (2021). DFOS applications to geo-engineering monitoring. *Photonic Sens.*, 11(2), 158–186.
- Skuja, L. (1998). Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide. *J. Non-Cryst. Solids*, 239(1), 16–48.
- Sladen, A., Rivet, D., Ampuero, J. P., De Barros, L., Hello, Y., Calbris, G., and Lamare, P. (2019). Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid Earth interactions on seafloor telecom cables. *Nat. Commun.*, 10(1), article no. 5777.
- Song, Z., Shi, B., Juang, H., Shen, M., and Zhu, H. (2017). Soil strain-field and stability analysis of cut slope based on optical fiber measurement. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 76(3), 937–946.
- Sorge, S., Fanelli, A., Tassini, C. C., De Natale, P., Ferraro, P., Rocco, A., Pierattini, G., and De Natale, G. (2005). Seismic and volcanic risk evaluation by large area geo-monitoring optical fibre sensor networks : the simona project. *WIT Trans. Built Environ.*, 82, 193–201.
- Sun, Y., Shi, B., Zhang, D., Tong, H., Wei, G., and Xu, H. (2016). Internal deformation monitoring of slope based on botdr. *J. Sens.*, 2016, article no. 9496285.
- Teng, L., Zhang, H., Dong, Y., Zhou, D., Jiang, T., Gao, W., Lu, Z., Chen, L., and Bao, X. (2016). Temperature-compensated distributed hydrostatic pressure sensor with a thin-diameter polarization-maintaining photonic crystal fiber based on Brillouin dynamic gratings. *Opt. Lett.*, 41(18), 4413–4416.
- Tosi, D., Molardi, C., and Blanc, W. (2021). Rayleigh scattering characterization of a low-loss MGO-based nanoparticle-doped optical fiber for distributed sensing. *Opt. Laser Technol.*, 133, article no. 106523.
- Tosi, D., Molardi, C., Blanc, W., Paixão, T., Antunes, P., and Marques, C. (2020a). Performance analysis of scattering-level multiplexing (SLMUX) in distributed fiber-optic backscatter reflectometry physical sensors. *Sensors*, 20(9), article no. 2595.
- Tosi, D., Molardi, C., Sypabekova, M., and Blanc, W. (2020b). Enhanced backscattering optical fiber distributed sensors : Tutorial and review. *IEEE Sens. J.*, 21(11), 12667–12678.
- Tosi, D., Schena, E., Molardi, C., and Korganbayev, S. (2018). Fiber optic sensors for sub-centimeter spatially resolved measurements : Review and biomedical applications. *Opt. Fiber Technol.*, 43, 6–19.
- Veber, A., Lu, Z., Vermillac, M., Pigeonneau, F., Blanc, W., and Petit, L. (2019). Nano-structured optical fibers made of glass-ceramics, and phase separated and metallic particle-containing glasses. *Fibers*, 7(12), article no. 105.
- Vermillac, M., Fneich, H., Turlier, J., Cabié, M., Kucera, C., Borschneck, D., Peters, F., Venegues, P., Neisius, T., Chaussedent, S., Neuville, D. R., Mehdi, A., Ballato, J., and Blanc, W. (2019). On the morphologies of oxides particles in optical fibers : Effect of the drawing tension and composition. *Opt. Mater.*, 87, 74–79.
- Vermillac, M., Lupi, J.-F., Peters, F., Cabie, M., Venegues, P., Kucera, C., Neisius, T., Ballato, J., and Blanc, W. (2017). Fiber-draw-induced elongation and break-up of particles inside the core of a silica-based optical fiber. *J. Am. Ceram. Soc.*, 100(5), 1814–1819.
- Waltermann, C., Baumann, A. L., Bethmann, K., Doering, A., Koch, J., Angelmahr, M., and Schade, W. (2015). Femtosecond laser processing of evanescent field coupled waveguides in single mode glass fibers for optical 3d shape sensing and navigation. In *Fiber Optic Sensors and Applications XII*, volume 9480, page 948011.

- International Society for Optics and Photonics, Bellingham, Washington, USA.
- Waltermann, C., Koch, J., Angelmahr, M., Burgmeier, J., Thiel, M., and Schade, W. (2014). Fiber-optical 3d shape sensing. *Springer Ser. Opt. Sci.*, 189, 227–250.
- Wang, C., Chen, J., Wang, J., and Chen, J. (2016). Flume testing of seepage velocity monitoring using optic fiber distributed temperature sensing for embankments. *Sens. Rev.*, 36(2), 120–129.
- Wang, Y. (2010). Review of long period fiber gratings written by CO<sub>2</sub> laser. *J. Appl. Phys.*, 108(8), article no. 081101.
- Wei, H.-Z., Xu, D.-S., and Meng, Q.-S. (2018). A newly designed fiber-optic based earth pressure transducer with adjustable measurement range. *Sensors*, 18(4), article no. 932.
- Williams, E. F., Fernández-Ruiz, M. R., Magalhaes, R., Vanthillo, R., Zhan, Z., González-Herráez, M., and Martins, H. F. (2019). Distributed sensing of microseisms and teleseisms with submarine dark fibers. *Nat. Commun.*, 10(1), article no. 5778.
- Yan, A., Huang, S., Li, S., Chen, R., Ohodnicki, P., Buric, M., Lee, S., Li, M.-J., and Chen, K. P. (2017). Distributed optical fiber sensors with ultrafast laser enhanced Rayleigh backscattering profiles for real-time monitoring of solid oxide fuel cell operations. *Sci. Rep.*, 7(1), 1–9.
- Yoshida, K., Takeshi, T., and Irasawa, M. (2002). The research on the application to the landslide using optical fiber sensors. In *Proceedings of International Congress Interpraevent 2002 in the Pacific Rim—Matsumoto/Japan*, pages 589–594.
- Zhan, Z. (2020). Distributed acoustic sensing turns fiber-optic cables into sensitive seismic antennas. *Seismol. Res. Lett.*, 91(1), 1–15.
- Zhang, C.-C., Shi, B., Gu, K., Liu, S.-P., Wu, J.-H., Zhang, S., Zhang, L., Jiang, H.-T., and Wei, G.-Q. (2018). Vertically distributed sensing of deformation using fiber optic sensing. *Geophys. Res. Lett.*, 45(21), 11–732.
- Zhang, L., Shi, B., Zhu, H., Yu, X., and Wei, G. (2020). A machine learning method for inclinometer lateral deflection calculation based on distributed strain sensing technology. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 79, 3383–3401.
- Zhang, Q. M., Zhu, P. Y., Wang, S. L., and Leng, Y. B. (2010). Research of botdr on dike strain monitoring. In *Applied Mechanics and Materials*, volume 36, pages 187–191. Trans Tech Publications, Baech, Switzerland.
- Zhou, Y., Zhu, P. Y., and Li, S. Y. (2013). Experimental research on embankment hidden defects monitoring using distributed optical fiber sensor. In *Applied Mechanics and Materials*, volume 351, pages 1183–1188. Trans Tech Publications, Baech, Switzerland.
- Zhou, Z., Wang, H., and Ou, J. (2006). A new kind of FBG-based soil-pressure sensor. In *Optical Fiber Sensors*, page ThE90. Optica Publishing Group, Washington, DC, USA, <http://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFS-2006-ThE90>.
- Zhu, P., Thévenaz, L., Leng, Y., and Zhou, Y. (2007). Design of simulator for seepage detection in an embankment based on distributed optic fibre sensing technology. *Chin. J. Sci. Instrum.*, 28(3), 431–436.