

*Cette ressource est issue d'un projet de recherche mené au laboratoire LMPS (Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS). Le thème des capteurs à fibres optiques est au cœur du travail de thèse de Sahar Farahbakhsh, encadré par Ludovic Chamoin et Martin Poncelet.*

La détection précoce de l'endommagement des structures permet d'améliorer leur sécurité et leur durabilité. Dans ce contexte, la surveillance des structures (contrôle santé - SHM<sup>1</sup>) est utilisée pour évaluer l'état des systèmes, améliorant ainsi la fiabilité structurelle et la gestion du cycle de vie. Différents types de capteurs ont été utilisés pour fournir des informations de surveillance dans le cadre du SHM. En particulier, les technologies de mesure par fibres optiques sont de plus en plus utilisées dans l'industrie, notamment pour l'évaluation de l'état des systèmes in situ<sup>2</sup>.

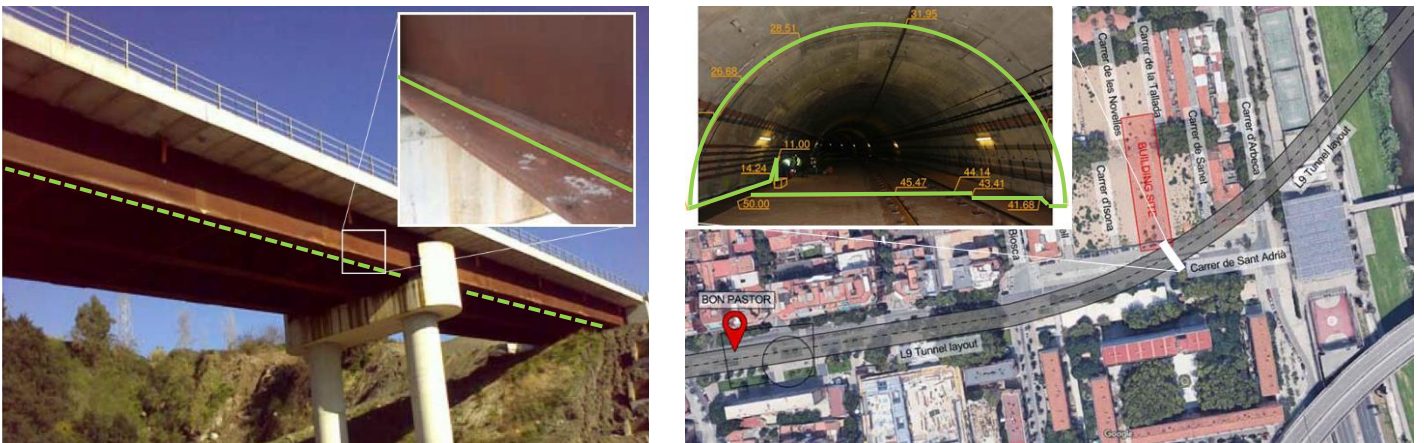


Figure 1 : Exemples d'utilisation de fibres optiques (en vert) pour la surveillance de pont et tunnel, sources [5,6]

Cette ressource fournit des informations brèves et générales sur les fibres optiques, leur utilisation et leurs avantages en matière de mesure de grandeurs physiques (déformation, température), ainsi que sur les phénomènes de diffusion sur lesquels fonctionnent les capteurs à fibres optiques.

## 1 - Introduction

Principalement utilisées pour la télécommunication, les fibres optiques sont également employées en tant que capteurs. Elles présentent plusieurs avantages qui en font un choix pratique et efficace. La fibre optique est un élément de détection flexible qui est simple à installer ou à intégrer dans les structures et qui ne nécessite pas d'alimentation électrique le long de la ligne de mesure. La petite taille et la légèreté des fibres optiques rendent la manipulation et le transport très faciles, avec généralement peu d'intrusion dans le système observé. Enfin, les fibres optiques sont immunisées contre les interférences électromagnétiques et peuvent résister aux environnements extrêmes (températures élevées, milieux corrosifs ...).

<sup>1</sup> Structural Health Monitoring (contrôle santé des structures)

<sup>2</sup> « in situ » désigne l'étude des systèmes « en situation d'usage », contrairement à un essai en laboratoire.

Du fait que les fibres optiques soient capables de fournir des mesures en temps réel et en continu avec une haute résolution spatiale, elles sont un bon candidat pour la détection en ligne d'événements localisés inattendus comme des endommagements. Néanmoins, ces capteurs présentent certains inconvénients et limitations, parmi lesquels on peut citer : leur fragilité et le soin requis lors de l'installation de la fibre, leur taille qui reste non-négligeable dans des structures telles que les composites comportant des fibres de carbone beaucoup plus petites que les fibres optiques, et le coût élevé du dispositif optique (interrogateur) qui analyse les données issues de la fibre.

## 2 - Géométrie d'une fibre optique

Qu'elles soient utilisées dans les télécommunications ou comme capteurs, les fibres optiques fonctionnent en propageant des signaux lumineux sur toute leur longueur, ce qui est possible grâce à la réflexion totale de la lumière à l'intérieur de l'élément. Pour mieux comprendre ces propriétés de guide d'ondes, il est nécessaire de connaître/comprendre la géométrie des fibres optiques.

Une fibre optique classique est un long élément cylindrique composé de trois parties (figure 2a) :

- Un noyau, ou cœur, généralement constitué de silice dopée pour augmenter l'indice de réfraction, d'un diamètre d'environ 5 à 10 micromètres pour une fibre monomode (SMF), et de 50 à 80 micromètres pour une fibre multimode (MMF) ;
- Une gaine entourant le noyau, faite de silice pure avec un indice de réfraction très légèrement inférieur (moins de 1% de différence avec le cœur) et un diamètre d'environ 125 micromètres ;
- Un revêtement généralement en plastique, qui fonctionne comme une couche de protection autour de la gaine et qui porte le diamètre de la fibre à environ 150-250 micromètres. Dans certains cas où une protection accrue est nécessaire en raison de l'environnement dans lequel la fibre est utilisée, une couche de protection supplémentaire peut alors être ajoutée au revêtement classique et porter le diamètre total à quelques millimètres.

Cette géométrie particulière, ainsi que la différence d'indice de réfraction entre la gaine et le noyau, créent un milieu approprié pour la propagation de la lumière. La géométrie des fibres optiques et le concept de réflexion interne totale sur la base duquel la lumière peut se propager dans la fibre sont présentés dans les Figures 2-(a) et 2-(b). La Figure 2-(c) montre schématiquement la propagation de la lumière à l'intérieur d'une fibre optique.

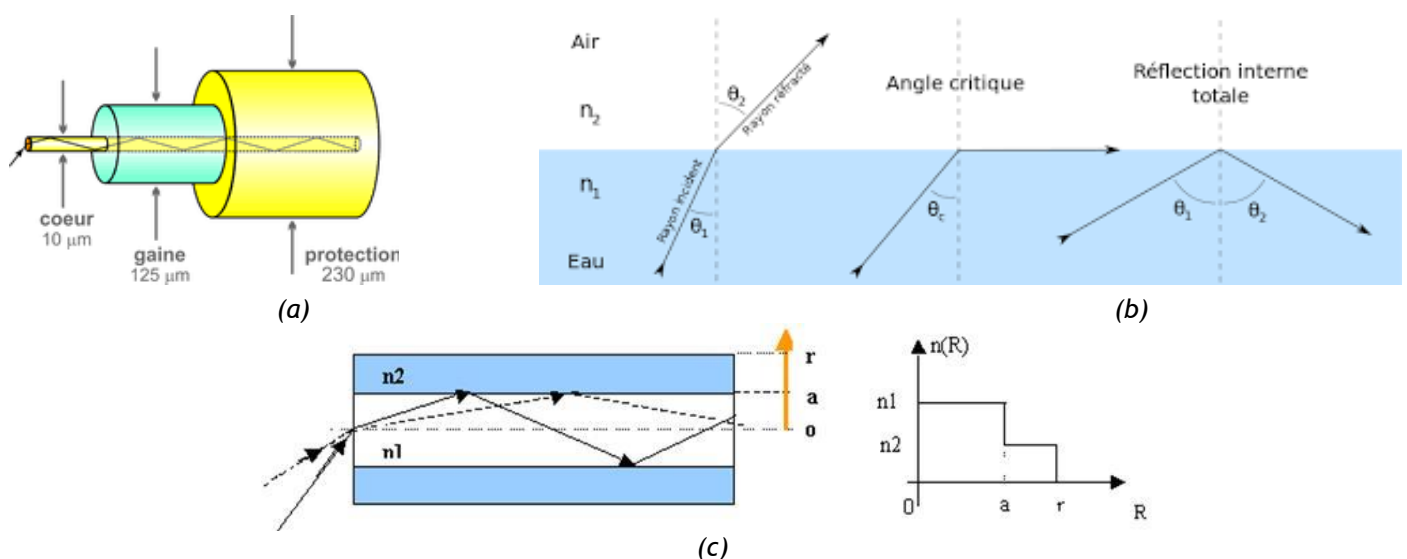


Figure 2 : (a) Géométrie d'une fibre optique monomode ; (b) Contexte de réflexion totale de la lumière dans un milieu ; (c) Propagation de la lumière dans le noyau d'une fibre optique

On peut facilement déduire de la Figure 2 que l'angle d'inclinaison des rayons de lumière entrante doit être inférieur à une valeur critique, créant ainsi un cône d'acceptation pour la lumière entrante qui lui permet de se propager le long de la fibre optique. Cette valeur, appelée ouverture optique, est calculée selon :

$$\sin \theta = n_{\text{noyau}} \sin \left( \frac{\pi}{2} - \theta_c \right) = \sqrt{n_{\text{noyau}}^2 - n_{\text{gaine}}^2} \approx \sqrt{2n_{\text{noyau}}\Delta n} ; \theta_c = \arcsin \left( \frac{n_{\text{gaine}}}{n_{\text{noyau}}} \right) ; \Delta n \ll 1 \quad (1)$$

avec  $n_{\blacksquare}$  l'indice de réfraction du milieu ( $\blacksquare$ ), et  $\Delta n$  la différence entre les indices de réfraction du noyau et de la gaine.

L'ouverture optique des fibres monomodes (SMF), dont ce document traite, est d'environ  $6^\circ$ , soit 0,11 rad.

### 3 - Perte optique dans les fibres

Il existe plusieurs sources d'atténuation dans les fibres optiques qui provoquent la perte de puissance du signal transmis. Cela peut être dû aux transitions verre-air ou aux interfaces diélectriques au niveau des raccords, ou encore aux conditions environnementales telles que la courbure excessive de la fibre, la micro flexion ou l'irradiation. Néanmoins, même si aucune de ces conditions ne s'applique, le signal subit toujours une atténuation le long de la fibre, qui est en fait le résultat de l'interaction de la lumière avec le milieu de propagation. Bien que très faibles dans la silice, ces pertes peuvent devenir considérables sur de longues distances. La décroissance de la puissance optique le long de la fibre peut être calculée par la loi de Beer-Lambert :

$$P(\lambda, z) = P_0 \cdot 10^{-\alpha(\lambda)z} \quad (2)$$

où  $P_0$  représente la puissance du signal à l'entrée de la fibre,  $P$  est la puissance optique à la position  $z$  le long de la fibre,  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière transmise, et  $\alpha$  est le coefficient d'atténuation qui dépend de  $\lambda$ .

La Figure 3 montre les variations du coefficient d'atténuation  $\alpha$  en fonction de la longueur d'onde de la lumière  $\lambda$  dans la silice. On constate que l'atténuation intrinsèque est plus faible et dominée par la diffusion de Rayleigh (détaillée ultérieurement) lorsque la longueur d'onde est comprise entre 300 nanomètres et 2 micromètres. Dans cette zone de faible atténuation, comme le montre la Figure 2, l'atténuation minimale<sup>3</sup> est atteinte lorsque la longueur d'onde de la lumière est d'environ 1550 nanomètres, soit la longueur d'onde généralement utilisée pour les fibres optiques SMF.

D'autres sources de diffusion dans les fibres de silice comprennent les diffusions Brillouin et Raman, avec des effets beaucoup plus faibles que la diffusion Rayleigh. Bien que d'autres phénomènes d'atténuation intrinsèque existent également dans les fibres optiques, ils ne sont pas utilisés pour la détection par fibre optique. En revanche, les diffusions Rayleigh, Raman et Brillouin sont largement utilisées ; ces phénomènes de diffusion et leurs caractéristiques sont présentés dans ce qui suit.

<sup>3</sup> Les valeurs du coefficient sont alors d'environ 0,2 dB/km, ce qui correspond à seulement quelques pourcents de perte sur un kilomètre.

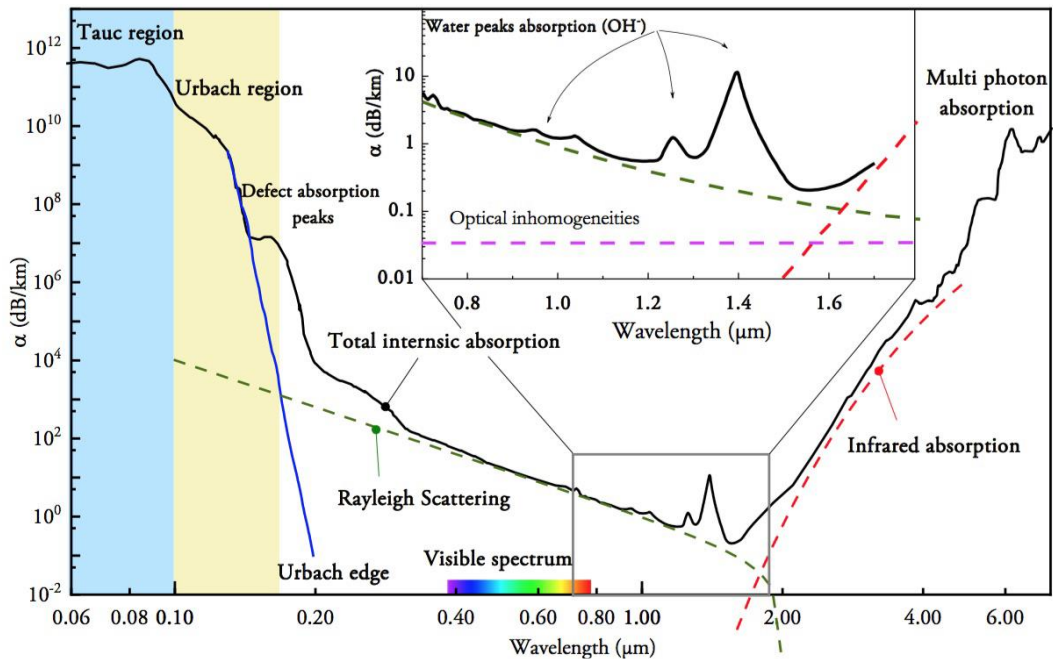


Figure 3 : Atténuation en fonction de la longueur d'onde dans une fibre optique en silice, source Buck 2004, p. 352 [9]

#### 4 - Phénomènes de diffusion dans les fibres optiques

Les diffusions Rayleigh, Brillouin et Raman peuvent être interprétées en termes de transferts d'énergie entre les photons et les molécules du milieu. En absorbant un photon incident de fréquence  $f_0$  une molécule du milieu atteint un niveau d'énergie plus élevé avec un électron excité. Il s'agit d'un niveau virtuellement instable, de sorte que la molécule ne peut pas rester longtemps à ce niveau et effectue presque immédiatement une transition vers un niveau d'énergie autorisé plus bas en émettant un nouveau photon. Les phénomènes de diffusion non-linéaires produisent des photons à des fréquences plus basses (diffusion Stokes Raman ou Stokes Brillouin) ou plus élevées (diffusion Anti-Stokes Raman ou Anti-Stokes Brillouin), alors qu'un phénomène linéaire élastique tel que la diffusion Rayleigh aboutit à l'émission d'un photon ayant exactement la même fréquence que la lumière incidente. Ces phénomènes sont schématisés dans la Figure 4. Les photons ré-émis se propagent dans toutes les directions, ce qui signifie qu'une partie de la lumière diffusée est nécessairement rétrodiffusée vers l'entrée de la fibre. Dans la détection par fibre optique, cette partie rétrodiffusée de la lumière est capturée à l'entrée et analysée pour obtenir des mesures de déformation ou de température, car la lumière rétrodiffusée porte l'information des changements le long de la fibre.

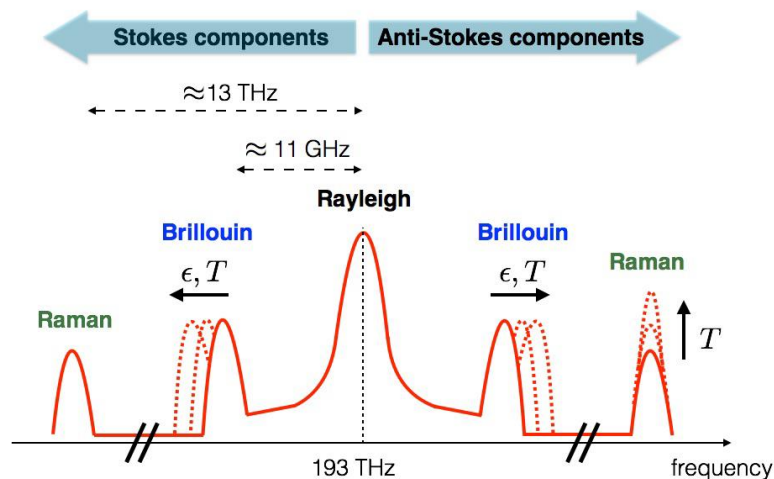


Figure 4 : Représentation schématique des composantes spectrales pour les diffusions Rayleigh, Raman et Brillouin

## 4.1 - Détection distribuée avec diffusion Raman

Les caractéristiques de la diffusion Raman dépendent des changements de température. C'est pourquoi ce phénomène est exclusivement utilisé pour la détection de la température. Les amplitudes associées aux composantes Stokes et anti-Stokes évoluent différemment avec la température. L'augmentation de la température accroît le niveau d'énergie vibratoire avant la diffusion, ce qui est nécessaire pour produire davantage de composantes anti-Stokes. Ainsi, les composantes anti-Stokes augmentent avec la température. Le signal Stokes, quant à lui, ne dépend pas beaucoup de la température. Après avoir envoyé une impulsion à partir d'une source laser, le rapport des intensités entre les composantes anti-Stokes ( $I_{AS}$ ) et Stokes ( $I_S$ ) rétrodiffusées est utilisé pour déduire la température le long de la fibre. Ce rapport se lit comme suit :

$$R(z, T) = \frac{I_{AS}(z, T)}{I_S(z, T)} \quad (3)$$

où  $z$  est la position et  $T$  la température correspondante. Les variations de température à chaque position sur la fibre peuvent être obtenues via (4) en convertissant la variation de l'intensité lumineuse

$$T(z) = \left[ \frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\nu_{opt}} \ln \left( \frac{R(z, T)}{R(z, T_0)} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

avec  $T_0$  la température de référence,  $R(z, T_0)$  le rapport entre les composantes Stokes et anti-Stokes à l'état de référence,  $k$  la constante de Boltzmann, et  $\nu_{opt}$  la fréquence du phonon optique créé.

Il convient de noter que la position  $z$  est connue grâce au « temps de vol » qui est mesuré par l'interrogateur, c'est-à-dire via la mesure du temps d'aller-retour de la lumière  $\Delta t$  jusqu'à la position  $z$ . On utilise pour cela la série d'équations (5) où  $v$  est la vitesse de propagation et  $n_{eff}$  l'indice de réfraction effectif.

$$\begin{cases} 2z = v\Delta t \\ v = \frac{c_0}{n_{eff}} \end{cases} \quad (5)$$

Dans cette technique, la résolution de la température est d'environ  $0,01^\circ\text{C}$ , ce qui en fait une méthode très précise de détection de la température. Néanmoins, cette technique utilise généralement des moyennes dans le temps et n'est donc pas adaptée aux changements rapides de température.

## 4.2 - Détection distribuée avec diffusion Brillouin

La diffusion Brillouin est due à de très petites ondes de pression, c'est-à-dire à des phonons acoustiques générés dans le cœur de la fibre lorsque l'intensité lumineuse atteint un niveau suffisant. Ces ondes produisent de nouvelles composantes décalées en fréquence vers le bas ou vers le haut en fonction de leur direction de propagation.

La détection par rétrodiffusion Brillouin repose sur l'analyse du spectre de fréquence renvoyé, et fournit des informations à la fois sur la déformation et la température. Cette rétrodiffusion est causée par la propagation des fluctuations de densité du milieu avec un changement périodique de l'indice de réfraction. L'intensité de la rétrodiffusion Brillouin est maximale lorsque le décalage de fréquence par rapport à la fréquence du signal incident correspond à la fréquence centrale de Brillouin :

$$v_B = \frac{2n_{eff}v_a}{\lambda_0} \quad (6)$$

sachant que  $v_a$  est la vitesse acoustique,  $n_{eff}$  l'indice de réfraction effectif, et  $\lambda_0$  la longueur d'onde de la lumière incidente.

Comme la vitesse acoustique  $v_a$  est sensible aux variations de déformation et de température qui se produisent dans la fibre, la fréquence centrale  $v_B$  l'est aussi. Les modifications de  $v_B$  sont données par la relation linéaire

$$\Delta v_B = C_\epsilon^B \Delta \epsilon + C_T^B \Delta T \quad (7)$$

où,  $C_\epsilon^B$  et  $C_T^B$  sont respectivement les coefficients de sensibilité par rapport aux déformations et changement thermique. Ces coefficients sont connus pour chaque milieu de propagation et chaque longueur d'onde. Par conséquent, en mesurant le décalage de la fréquence de Brillouin distribuée le long de la fibre, il est possible d'estimer avec précision les conditions de température et de déformation de la fibre optique.

### 4.3 - Détection distribuée avec diffusion Rayleigh

La diffusion de Rayleigh est un processus élastique stable et linéaire, provoqué par des inhomogénéités du milieu, des particules matérielles ou des défauts de taille beaucoup plus petite (de l'ordre du nanomètre) que la longueur d'onde de propagation. Elle ré-émet aléatoirement des photons dans toutes les directions tout en conservant l'énergie. La diffusion Rayleigh est un phénomène que nous observons quotidiennement ; la lumière du soleil se propageant dans l'atmosphère, interférant avec les petites particules en suspension dans l'air et se diffusant dans toutes les directions produisant la couleur bleue du ciel en est un parfait exemple. Dans les fibres optiques, les inhomogénéités sont les inévitables défauts, impuretés et altérations d'indice de réfraction. La lumière diffusée se propage dans toutes les directions et la partie rétrodiffusée de la lumière est capturée pour obtenir des informations de mesure. Ce signal rétrodiffusé dans l'état de référence de la fibre porte des informations qui sont considérées comme la signature de la fibre. Ce signal de référence peut être utilisé comme base de comparaison avec le signal rétrodiffusé lorsque la fibre subit des changements environnementaux, et révéler la position et l'intensité des mesures.

Plus d'informations concernant les différentes méthodes de détection basées sur la rétrodiffusion de Rayleigh sont fournies dans la ressource « *Fibres optiques : technologies FBG, OTDR et OFDR* » [7].

La vidéo « *Surveillance en temps réel d'une poutre en aluminium à l'aide d'un capteur de déformation à fibre optique OFDR* » issue d'une manipulation simple permet d'illustrer une utilisation des fibres optiques OFDR [8].

### Remerciements

Ce document est issu d'un projet qui a reçu un financement du Conseil européen de la recherche (CER) dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne (convention de subvention n° 101002857).

## Références :

- [1] L. Chamoin, S. Farahbakhsh, and M. Poncelet, “An educational review on distributed optic fiber sensing based on Rayleigh backscattering for damage tracking and structural health monitoring,” *Measurement Science and Technology*, vol. 33, p. 124008, Dec. 2022.
- [2] Z. Ding, C. Wang, K. Liu, J. Jiang, D. Yang, G. Pan, Z. Pu, and T. Liu, “Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: A review,” *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1072, 2018. Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [3] X. Bao and Y. Wang, “Recent advancements in Rayleigh scattering-based distributed fiber sensors,” *Advanced Devices & Instrumentation*, vol. 2021, 2021. Publisher: Science Partner Journal.
- [4] X. Bao and L. Chen, “Recent progress in distributed fiber optic sensors,” *Sensors*, vol. 12, no. 7, pp. 8601-8639, 2012.
- [5] A. Minardo, R. Bernini, L. Amato and L. Zeni, “Bridge Monitoring using Brillouin Fiber-Optic Sensors,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 1, January 2012
- [6] J. Gomez, J.R. Casas and S. Villalba, “Structural Health Monitoring with Distributed Optical Fiber Sensors of tunnel lining affected by nearby construction activity”, *Automation in Construction*, vol. 117, pp. 103261, 2020.
- [7] S. Farahbakhsh, L. Chamoin and M. Poncelet, “Fibres optiques : technologies FBG, OTDR et OFDR”, *Culture Sciences de l’Ingénieur*, septembre 2023, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/fibres-optiques-technologies-fbg-otdr-ofdr](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/fibres-optiques-technologies-fbg-otdr-ofdr)
- [8] S. Farahbakhsh, L. Chamoin and M. Poncelet, “Surveillance en temps réel d’une poutre en aluminium à l’aide d’un capteur de déformation à fibre optique OFDR” (vidéo), *Culture Sciences de l’Ingénieur*, octobre 2023, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/suveillance-temps-reel-poutre-aluminium-avec-capteur-deformation-fibre-optique-ofdr](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/suveillance-temps-reel-poutre-aluminium-avec-capteur-deformation-fibre-optique-ofdr)
- [9] : J.A. Buck, *Fundamentals of Optical Fibers*, 2nd edition, Wiley, 2004