

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 ressource « Capteurs à fibres optiques : principe de fonctionnement » [6] propose des informations brèves et générales sur les fibres optiques, leur utilisation et leurs avantages en matière de mesure de grandeurs physiques, alors que celle-ci se concentre sur les technologies les plus courantes de capteurs à fibres optiques distribuées basées sur la diffusion de Rayleigh. Après une brève présentation des capteurs à fibres optiques quasi-distribués appelés Fiber Bragg Gratings, les technologies des capteurs distribués, plus récents et utilisés de façon croissante, sont expliqués.

## 1 - Fibres de Bragg (Fiber Bragg Grating - FBG)

Ces fibres permettent une détection multipoint, c'est-à-dire une mesure quasi-distribuée, et pas entièrement distribuée. Dans cette méthode de détection, un court segment du noyau de la fibre est marqué volontairement à l'endroit souhaité par un réseau périodique. Selon le principe de la diffraction de Bragg, cette action produit une modulation de l'indice de réfraction du noyau qui se traduit par un miroir diélectrique spécifique à la longueur d'onde. Ce miroir reflète une longueur d'onde spécifique de la lumière incidente à large bande, mais laisse passer toutes les autres longueurs d'onde, agissant comme un filtre de longueur d'onde à bande passante.

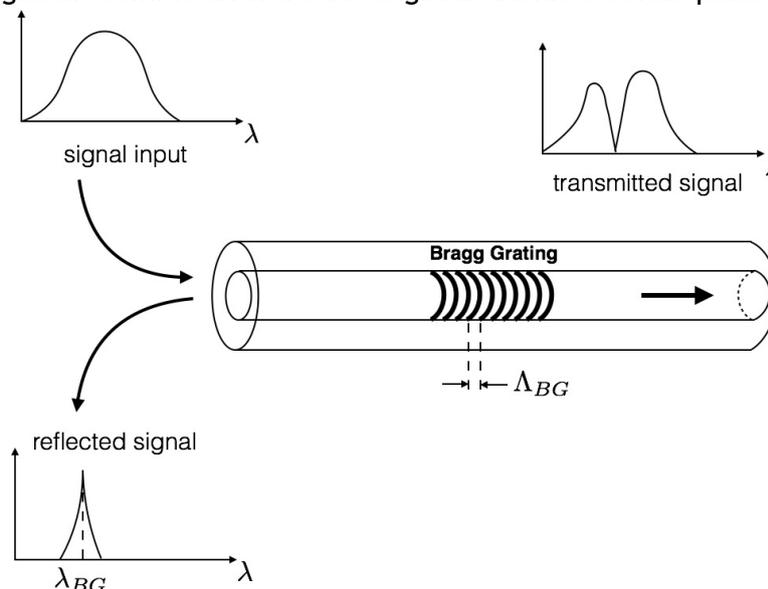


Figure 1 : Principe des fibres de Bragg

La longueur d'onde filtrée suit la condition de Bragg :

$$\lambda_{BG} = 2n_{eff}\Lambda_{BG} \quad (1)$$

où  $\Lambda_{BG}$  est la période du réseau, de l'ordre du micromètre, et  $n_{eff}$  est l'indice de réfraction effectif.

Lorsque la fibre subit un changement environnemental, tel qu'une modification de la température ou de la déformation au niveau de l'emplacement du réseau, elle se dilate ou se rétrécit légèrement ce qui entraîne une modification de la période du réseau sur le noyau de la fibre ( $\Lambda_{BG}$ ), ainsi que de  $n_{eff}$ . Le décalage de la longueur d'onde centrale reflétée peut être obtenu par (2) :

$$\begin{cases} \frac{\Delta\Lambda_{BG}}{\Lambda_{BG}} = C_{\epsilon}^{BG} \Delta\epsilon + C_T^{BG} \Delta T \\ C_{\epsilon}^{BG} = 1 - p_e \\ C_T^{BG} = \alpha_{n_{eff}} + \alpha_{\Lambda_{BG}} \end{cases} \quad (2)$$

où  $p_e$  est le coefficient photo-élastique,  $\alpha_{n_{eff}}$  est le coefficient thermo-optique, et  $\alpha_{\Lambda_{BG}}$  est le coefficient de dilatation thermique de la fibre, tous les trois étant constants pour un matériau connu. Par conséquent, le coefficient de déformation  $C_{\epsilon}^{BG}$  et le coefficient de température  $C_T^{BG}$  sont aussi connus pour chaque matériau, ici la silice, et les variations de déformation ou de température peuvent être facilement calculées par (2). L'inconvénient le plus important des capteurs FBG est la nécessité de connaître a priori les endroits critiques à surveiller pour positionner les réseaux de Bragg. Leur coût de fabrication est plus élevé qu'une fibre standard puisqu'il y a l'opération de gravure des réseaux en plus. Ces capteurs ont néanmoins été largement utilisés dans l'industrie.

## 2 - Rappel sur la diffusion Rayleigh

La diffusion de Rayleigh est le phénomène d'interférence de la lumière avec de petites inhomogénéités dans son milieu de propagation, c'est-à-dire des inhomogénéités beaucoup plus petites que la longueur d'onde de la lumière qui se propage. Dans les fibres optiques, ces inhomogénéités sont les défauts et les fluctuations inévitables de l'indice de réfraction qui résultent du processus de fabrication. La diffusion de Rayleigh est le principe essentiel sur lequel reposent les capteurs à fibre optique les plus communs.

Lorsque la lumière incidente interfère avec une particule, la lumière se disperse dans toutes les directions et une fraction de cette lumière est naturellement rétrodiffusée vers l'entrée de la fibre.

Il est intéressant de noter que les fluctuations aléatoires de l'indice de réfraction dans le noyau, qui génèrent la diffusion de Rayleigh, peuvent être considérées comme un long et faible réseau de Bragg avec une variation aléatoire de l'amplitude et de la phase.

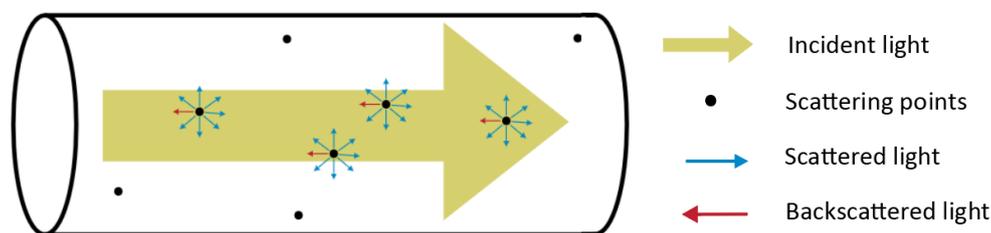


Figure 2 : Diffusion de Rayleigh dans le noyau de la fibre

La lumière rétrodiffusée est capturée à l'entrée de la fibre pour être analysée à des fins de détection. La diffusion de Rayleigh ne modifie pas la fréquence de la lumière, ni la partie diffusée, ni le signal transmis en cours ; une caractéristique spécifique qui a conduit au développement des capteurs OTDR et OFDR présentés dans les sections suivantes.

### 3 - Rétrodiffusion Rayleigh analysée dans le domaine temporel (OTDR)

La méthode OTDR est la technique de réflectométrie la plus courante et la plus simple, qui a été introduite à l'origine pour la détection des défauts et la localisation des connexions, etc. La Figure 3 présente un aperçu schématisé d'une installation OTDR.

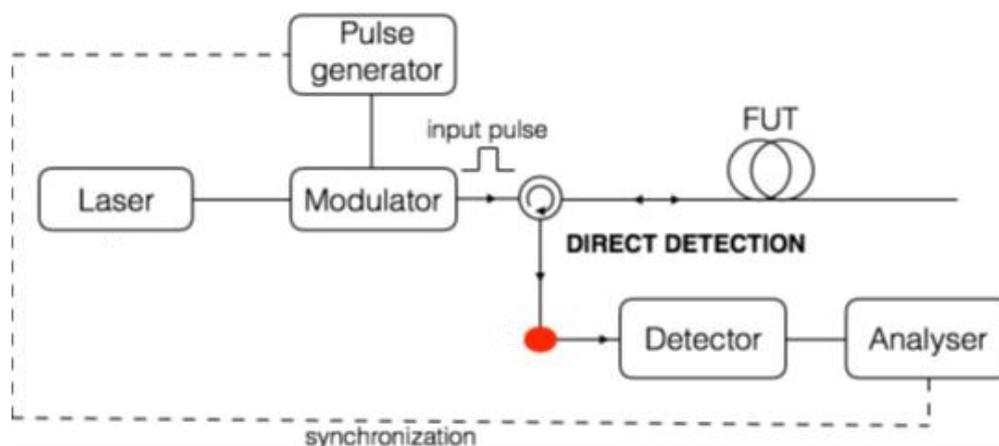


Figure 3 : Configuration d'un système OTDR classique

Dans le concept OTDR, une source laser produit de courtes impulsions optiques à large bande, qui sont transmises dans la fibre, et l'intensité de la lumière rétrodiffusée est mesurée en fonction du temps, ce qui permet d'obtenir un diagramme de la puissance du signal en fonction de la longueur de la fibre (Figure 4). L'impulsion suivante ne peut être envoyée que lorsque la précédente a parcouru la longueur de la fibre et est revenue, afin d'éviter l'interférence d'impulsions différentes produites à des moments différents. La fréquence de mesure est donc limitée par la longueur de la fibre.

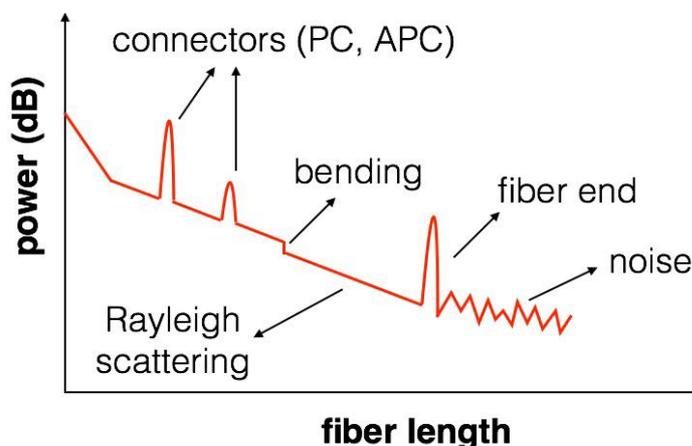


Figure 4 : Tracé schématisé de la puissance du signal obtenue par OTDR

Les changements dans le diagramme de Rayleigh permettent de récupérer des informations sur la déformation locale ou la température, en raison de leur relation linéaire avec les changements dans la longueur du chemin optique entre les centres de diffusion de la section correspondante de la fibre (Figure 5). La réflexion de l'intensité est collectée dans le domaine temporel, transférée dans le domaine fréquentiel via la transformée de Fourier rapide, et mise en corrélation croisée avec le signal de référence pour obtenir les grandeurs mesurées.

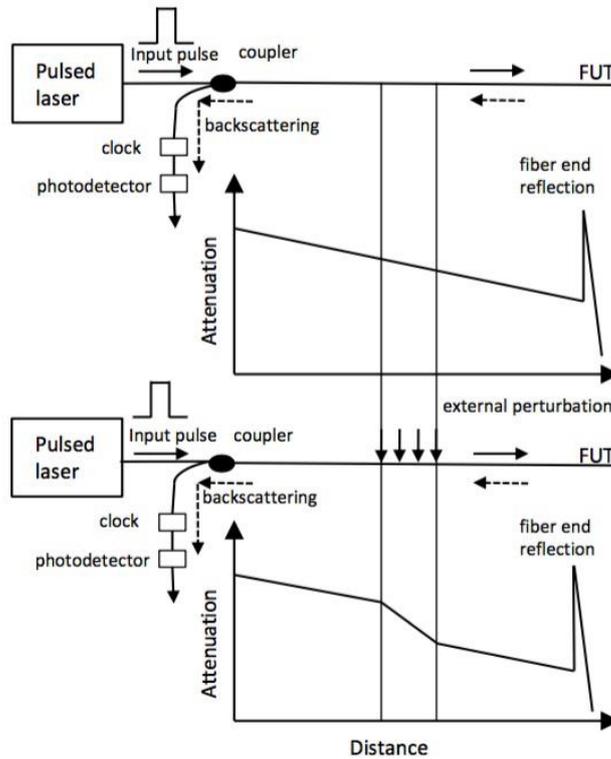


Figure 5 : Modification du diagramme OTDR suite à des changements environnementaux (déformation ou température) dans la fibre

La résolution spatiale de l'OTDR, qui correspond à la plus petite distance entre deux centres de diffusion pouvant être résolue, est déterminée par la durée  $\tau_p$  de l'impulsion optique transmise, comme l'illustre le diagramme de Minkowski de la Figure 6. Si l'on considère une impulsion rectangulaire de largeur  $L_p$  dans la fibre, qui occupe l'espace représenté par le segment rouge au temps  $t = 0$ , le signal détecté au point spatio-temporel  $(0, 2t_1)$  correspond à la superposition de faibles réflexions provenant de centres de diffusion répartis de manière aléatoire dans la section de la fibre entre les positions  $z_2$  et  $z_1$  (zone grise sur la Figure 6) ; les signaux peuvent être additionnés de manière cohérente car l'espacement entre les centres de diffusion est beaucoup plus petit que la longueur d'onde optique.

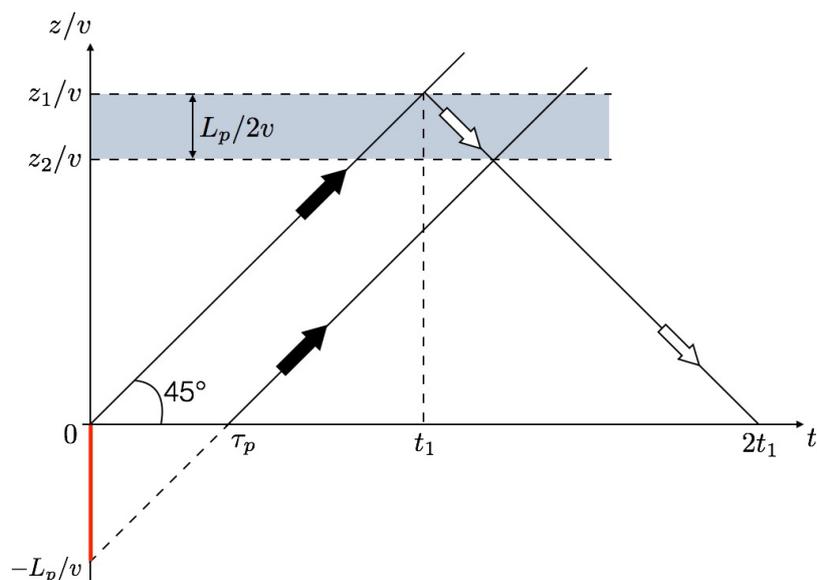


Figure 6 : Diagramme de Minkowski illustrant la propagation d'une impulsion incidente et de la rétrodiffusion de Rayleigh correspondante

La résolution spatiale, est donc la suivante :

$$\Delta z_{min} = \frac{L_p}{2} = \frac{c_0 \tau_p}{2n_{eff}}$$

Cette résolution peut être améliorée en réduisant la largeur de l'impulsion/durée, ce qui a pour effet d'affaiblir l'énergie de l'impulsion et d'augmenter le niveau de bruit, ce qui accroît le rapport signal/bruit. Inversement, l'amélioration du rapport signal/bruit entraîne une diminution de la résolution spatiale. Ce compromis obligatoire est la limitation la plus importante de la méthode OTDR classique.

#### 4 - Rétrodiffusion Rayleigh analysée dans le domaine fréquentiel (OFDR)

Le concept principal de l'OFDR est représenté schématiquement dans les Figures 7 et 8. Cette technique est l'une des méthodes les plus récentes de capteurs basés sur la diffusion Rayleigh, qui a permis d'améliorer considérablement la résolution spatiale et la fréquence de mesure. Dans les capteurs OFDR, une source laser accordable (TLS) est utilisée pour produire un signal continu avec une fréquence variant linéairement avec le temps (signal en dent de scie de la Figure 7). Cette lumière incidente est ensuite divisée en deux rayons identiques. L'un est envoyé à un bras de référence (une fibre optique de longueur fixe), tandis que l'autre est transmis à la fibre testée (FUT). La lumière rétrodiffusée par ces deux fibres est collectée à leur entrée et couplée, produisant un signal combiné qui est ensuite analysé par un interféromètre. Étant donné que le temps de parcours de la lumière jusqu'à chaque point de diffusion sur la FUT est légèrement plus long que celui du bras de référence (voir figure 3), il y a un petit délai entre la lumière rétrodiffusée par ces deux fibres. Par conséquent, en un même instant, chacune a une fréquence légèrement différente (vu que la source a émis une lumière de fréquence variant avec le temps). La combinaison des deux lumières rétrodiffusées collectées produit donc un signal qui porte une fréquence de battement unique pour chaque point de diffusion le long de la FUT. En outre, il est évident que le délai est dû au temps de vol de la lumière jusqu'au point de diffusion sur la FUT. Chaque fréquence de battement dans le signal couplé correspond donc à une seule particule diffusante, et son amplitude peut révéler la position de cette particule spécifique.

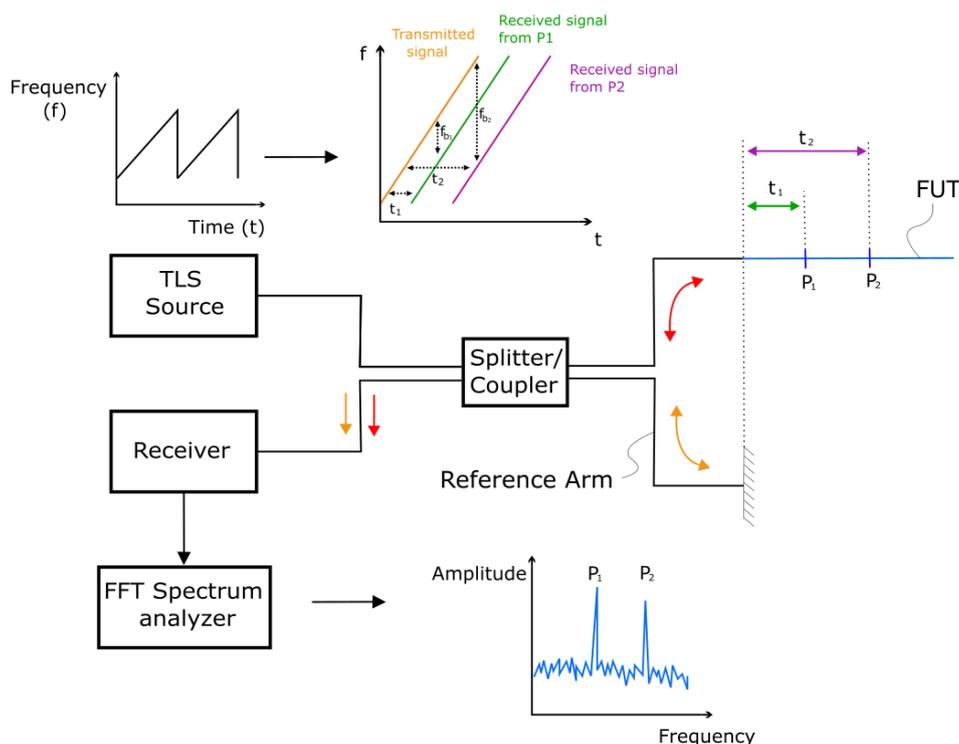


Figure 7 : Principe de l'OFDR utilisant l'interférométrie

Afin d'obtenir ces fréquences de battement à partir du signal, il est nécessaire d'appliquer une transformée de Fourier rapide (FFT) pour le convertir du domaine temporel au domaine fréquentiel. En effectuant cette procédure sur la fibre dans son état de référence, c'est-à-dire avant qu'elle subisse tout changement de température ou de déformation, on obtient une « empreinte digitale » unique pour la fibre considérée comme étant à son état taré. Le signal de l'empreinte, ou signature de rétrodiffusion de Rayleigh de la fibre (RBS), reste le même à moins que la fibre ne subisse un changement environnemental. Toute modification de la température ou de la déformation le long de la fibre entraîne un léger déplacement de la position des points de diffusion, ce qui modifie la signature de la fibre.

Cette procédure est appliquée en continu au signal couplé lorsque la fibre subit des variations de déformation ou de température, ce qui entraîne des signaux de mesure différents de la signature optique de la fibre. En effectuant une seconde FFT, la signature et le signal de mesure sont transférés dans le domaine spatial, où ils sont divisés en petites fenêtres  $\Delta x$  définissant la résolution spatiale du capteur OFDR. Pour chaque fenêtre  $\Delta x$ , les deux signaux divisés sont à nouveau transférés dans le domaine des fréquences via une transformée de Fourier inverse. Chaque fenêtre donne lieu à deux spectres, qui sont ensuite corrélés entre eux.

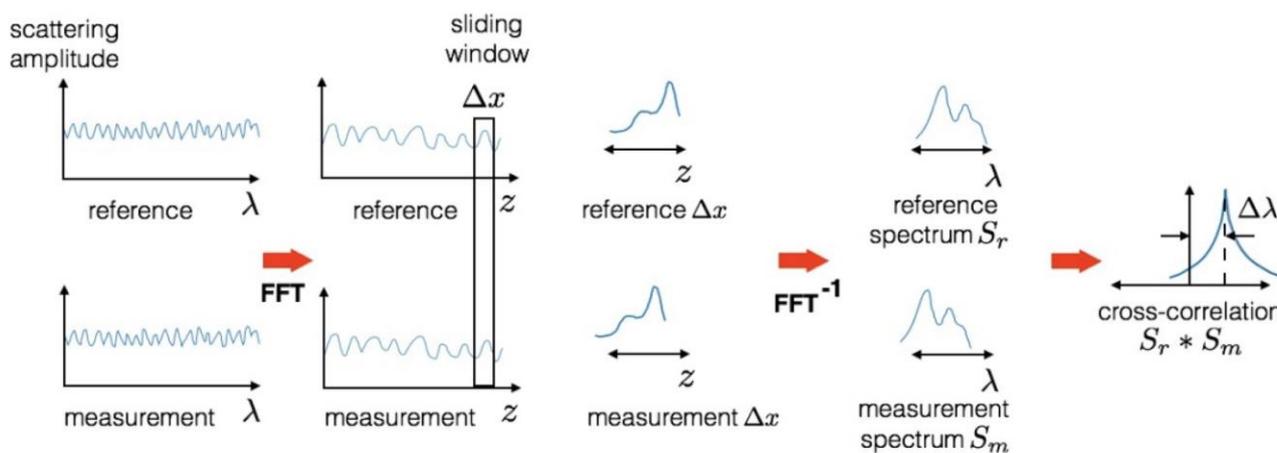


Figure 8 : Processus de corrélation croisée dans l'OFDR

Cette corrélation croisée fait apparaître un décalage de fréquence dans les fenêtres où des changements de température ou de déformation se sont produits. Ce décalage de fréquence est linéairement lié aux altérations de température et de déformation, et la position de la fenêtre contenant le décalage de fréquence révèle l'emplacement de la mesure. Par conséquent, ce processus permet de tracer les mesures de température ou de déformation dans l'ensemble de la fibre.

La technique OFDR permet à la détection par fibre optique d'atteindre une fréquence de mesure élevée et d'augmenter de manière impressionnante la résolution spatiale le long de la fibre. Un dispositif à fibre optique OFDR haut de gamme, exploité par l'unité d'interrogation Luna ODiSI, peut fournir des mesures tous les 0,65 millimètres avec une fréquence de mesure aussi élevée que 62,5 Hz. La fréquence de mesure peut atteindre 250 Hz pour des résolutions spatiales plus grandes que 0,65 millimètres. Le tableau 1 présente un aperçu des capacités de l'interrogateur Luna ODiSI, obtenu directement sur le site web de l'entreprise.

Tableau 1- Performances du dispositif d'interrogation Luna ODiSI

Parameter		Specification				
Number of channels		1, 2, 4 or 8 channels				
Maximum sensor length per channel	Standard	10 m				
	Extended range	50 m				
Standoff cable length <sup>1</sup>		10, 50, 100, 150 or 200 m				
Maximum patch cord length <sup>2</sup> (patch cords can be added between remote module and sensor)	Standard	9 m				
	Extended range	19 m				
<b>High-Definition Strain and Temperature Mode<sup>3</sup></b>						
		ODiSI 610x				ODiSI 600x
Gage pitch <sup>4</sup>		0.65 mm	1.3 mm	2.6 mm	5.2 mm	5.2 mm
Gages (measurement locations) per meter of sensor		1,538	768	384	192	192
Measurement rates (Rates are aggregate; divide by number of active channels to determine the per-channel rate)	2.5 m mode	62.5 Hz	125 Hz	250 Hz	250 Hz	30 Hz
	5 m mode	40 Hz	80 Hz	160 Hz	160 Hz	20 Hz
	10 m mode	25 Hz	50 Hz	100 Hz	100 Hz	12.5 Hz
	20 m mode	12.5 Hz	25 Hz	50 Hz	50 Hz	6.3 Hz
	50 m mode	-	10 Hz	20 Hz	20 Hz	2.5 Hz
Strain measurement range		±15,000 µε				
Resolution		0.1 µε				
Instrument accuracy		±1 µε				
System (instrument and sensor) accuracy <sup>5</sup>		±25 µε	±30 µε	±30 µε	±30 µε	±30 µε
Measurement uncertainty at zero strain <sup>6</sup>	Standard	±10 µε	±6 µε	±4 µε	±4 µε	±4 µε
	Extended range	±14 µε	±7 µε	±4 µε	±4 µε	±4 µε
Measurement uncertainty across full strain range <sup>6</sup>		±22 µε	±16 µε	±4 µε	±4 µε	±4 µε
Dynamic loading rate		1 Hz	2.5 Hz	5 Hz	5 Hz	1 Hz
Temperature measurement range (standard sensor)		-40 to 200 °C				
Resolution		0.1 °C				
Measurement uncertainty <sup>6</sup>		±2.2 °C	±1.6 °C	±0.6 °C	±0.6 °C	±0.6 °C

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 l'utilisation des fibres optiques OFDR [8].

## 5 - Conclusion

Avec « *Capteurs à fibres optiques : principe de fonctionnement* » [6] et cette présente ressource, les capteurs à fibre optique classiques ont été brièvement présentés mettant l'accent sur les capteurs distribués à base de diffusion Rayleigh. Ces capteurs sont de plus en plus répandus et la technologie s'améliore très rapidement. Néanmoins, il reste des inconvénients et des limitations à surmonter, notamment ce qui a déjà été mentionné dans les deux ressources (par exemple leur fragilité, leur taille non négligeable dans certaines structures, et le coût élevé de l'interrogateur, ainsi que les limitations de chacune des techniques présentés), ainsi que la forte corrélation entre la déformation et la température dans les mesures. Bien que plusieurs techniques aient été proposées pour résoudre ce problème, aucune d'entre elles n'est actuellement en mesure de le supprimer complètement.

## 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] [www.lunainc.com](http://www.lunainc.com)

[6] S. Farahbakhsh, L. Chamoin and M. Poncelet, “Fibres optiques : principe de fonctionnement”, *Culture Sciences de l’Ingénieur*, septembre 2023, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/capteurs-fibres-optiques-principe-de-fonctionnement](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/capteurs-fibres-optiques-principe-de-fonctionnement)

[7] 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)