

# CEMENTYS



A SOCOTEC COMPANY

Siège Social :

27, Villa Daviel, 75013 Paris

Tel. : 01 69 93 88 82

Fax. : 01 69 93 88 83

BE, Laboratoire & Formations :

9, rue Léon Blum 91120 Palaiseau

Agence de Brest :

53 Bd Jean Moulin, 29200 Brest

Centre d'Essais de la Manche :

5, La Fosse Yvon, 50440 Beaumont-Hague

Agence de Houston :

11811 North Freeway Suite 500 Houston, Texas 77060

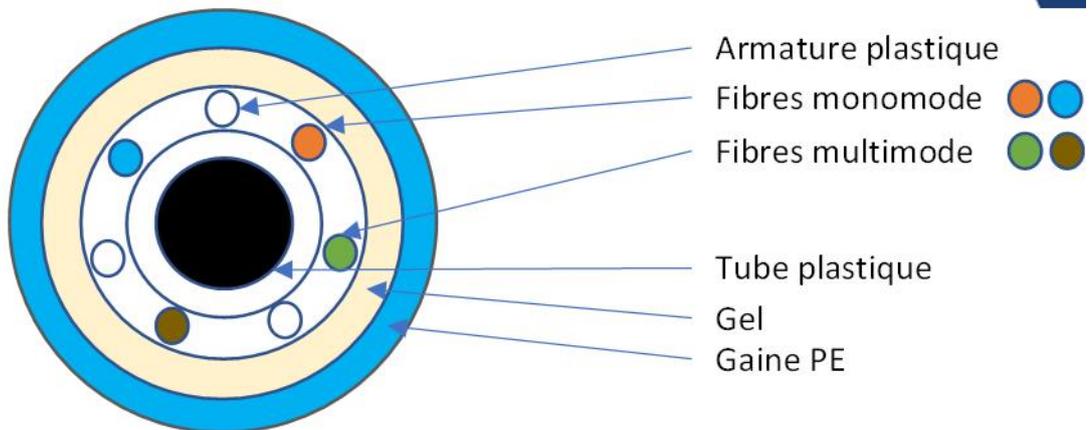
Agence de Hanoï :

59 Nguyen Ngoc Vu, Cau Giay, Hanoi Vietnam

[www.cementys.com](http://www.cementys.com)

## SensoLux TMA<sup>®</sup>

Fibre optique pour mesures  
distribuées (DAS, DTS, DSS)



## TROPHEE DE L'INNOVATION

Miyassa Salhi  
Ayemen Gargouri  
Emmanuel Mengue

# SOMMAIRE

1. PREAMBULE .....	2
1.1. Objet du document.....	2
1.2. L’auscultation géotechnique chez CEMENTYS .....	2
2. CONTEXTE .....	3
2.1. Domaine d’application .....	3
2.2. La fibre optique comme capteur .....	4
3. INNOVATION .....	4
3.1. Principe des capteurs à fibre optique répartis .....	4
3.2. Le capteur à fibre optique réparti SensoLux TMA® .....	5
3.3. Méthodologie de chantier .....	6
Résultats et avantages.....	8
3.4. par rapport aux méthodes traditionnelles.....	8
4. REFERENCES .....	10
5. ANNEXES .....	11
5.1. Projets similaires avec CFOR SensoLux TMA® .....	11
5.2. Fiche technique CFOR SensoLux TMA® .....	12

# 1. PREAMBULE

## 1.1. Objet du document

L'utilisation des mesures réparties de température et de déformation par fibre optique est intéressante pour l'auscultation des ouvrages en béton, car elle permet d'améliorer le suivi des phases particulières de leur comportement, comme l'exothermie du béton, la décroissance de la température aux jeunes âges, la mesure du profil de déformation de la structure, ou pour conforter les modèles de comportement à long terme. Cet article présente les étapes de la mise en place du capteur à fibre optique réparti (CFOR) SensoLux TMA<sup>®</sup>, noyé dans le béton de la paroi moulée et le retour de mesures de températures acquises en conditions réelles d'emploi, depuis 6 mois. L'aspect innovant est mis en avant.

## 1.2. L'auscultation géotechnique chez CEMENTYS

Spécialiste de la surveillance des ouvrages du génie civil (tunnels, barrages, ponts, ports, infrastructures de l'Energie), CEMENTYS est chef de file en France de la démarche d'ingénierie de la maintenance basée sur le diagnostic et le monitoring, permettant de garantir la maîtrise des risques pendant les phases de construction et de l'exploitation des infrastructures sur le long terme (fondateur et animateur de l'Association Française de Civionique, Membre du conseil de l'IMGC, [www.imgc.fr](http://www.imgc.fr), membre du CFMS, AFGC et AFTES). La technicité de l'équipe Auscultation de CEMENTYS est reconnue par les ingénieries (SYSTRA, Tractebel, SETEC, EGIS, Arcadis, B&G) et Maître d'Ouvrages Ferroviaires (SNCF, RATP, EOLE, SGP, MESEA). CEMENTYS est aussi bien implantée en France qu'à l'international (Figure 1)



Figure 1. CEMENTYS dans le monde : Filiales à Houston et Hanoi

L'équipe CEMENTYS maîtrise les technologies de capteurs du Génie Civil (corde vibrante, fibre optique, inductif), leur mise en œuvre et les interprétations associées pour définir les niveaux de risques (calcul de convergence de tunnels, déformations limites vis-à-vis d'une vulnérabilité de bâti, tassement différentiels limites, calcul d'ouverture de fissures). Enfin, CEMENTYS possède l'expertise Logiciel et Hardware pour ausculter des ouvrages avec un

grand nombre de capteurs en visualisation temps réel. Aujourd'hui, CEMENTYS surveille en temps réel une cinquantaine d'ouvrages avec plus de 7 000 voies de mesure en acquisition temps réel (logiciel THMInsight® hébergé dans notre DataCenter de Palaiseau).

Depuis sa création, le groupe CEMENTYS développe et pose des systèmes d'auscultation dédiés au génie civil et aux ouvrages dont la qualité de l'instrumentation est primordiale. Spécialisée dans les ouvrages sensibles (Génie Civil, Nucléaires, Militaires, Pétrole & Gaz, monuments historiques), notre équipe est engagée dans un processus de qualité sur les phases de fabrication et qualification des capteurs et de leur mise en œuvre sur le terrain.

## 2. CONTEXTE

### 2.1. Domaine d'application

Pour mieux maîtriser et caractériser le vieillissement des structures de génie civil (Parois moulées, fondation, ponts, tunnels, etc.) et des réseaux de transports (lignes ferroviaires) et permettre ainsi de minimiser les risques et les nuisances, il est nécessaire d'utiliser un système de contrôle non destructif de la santé des structure (SHM pour Structural Health Monitoring) qui possède plusieurs qualités dont ; une durée de vie assez longue et une implantation peu intrusive qui respecte le fonctionnement de l'édifice à surveiller. Le système doit permettre à la fois la surveillance des structures moins sensibles à hautement sensibles (comme les centrales nucléaires). Pour permettre une auscultation pertinente, un tel dispositif de mesure doit délivrer des données de température et de déformation en temps réel et sur l'ensemble de l'ouvrage. A ce titre les capteurs à fibres optiques (CFO), ont profité de l'essor des télécommunications pour offrir des solutions novatrices aux industriels. Parmi eux, le CFOR SensoLux TMA® de CEMENTYS, dont la simple fibre constitue l'élément sensible. L'utilisation du CFOR SensoLux TMA® de CEMENTYS comme SHM est un choix judicieux du fait de sa souplesse (qui simplifie son installation) et de son faible encombrement.

Le CFOR SensoLux TMA® de CEMENTYS est utilisé pour diverses applications :

- Suivi des déformations dans tout type d'environnement (DSS) ;
- Suivi des vibrations dans les ouvrages (DAS/DVS) ;
- Suivi de contrôle de la température (DTS) ;
- Surveillance des structures sensibles.

De nos jours, une grande partie des infrastructures existantes sont anciennes et ne sont plus adaptées aux normes de sécurité actuelles. Les centres urbains étant de plus en plus congestionnés, la demande d'espace utilisable pour le développement a entraîné une tendance à la construction de nouveaux ouvrages à proximité des structures existantes. Le besoin de surveillance de l'intégrité de ces structures existantes se fait alors particulièrement ressentir pendant les travaux de construction des ouvrages qui se trouvent à proximité. Elle permet d'évaluer les mouvements et les déformations potentiels et ainsi, de réduire les dommages probables pendant les périodes de construction et de service. D'un autre côté, la capacité à surveiller l'état de santé des structures sur le long terme permet d'effectuer une maintenance et/ou un renouvellement basé sur l'état, plutôt qu'une maintenance réactive ou basée sur le temps. Il en résulte ainsi une réduction de l'interruption du service des structures en question et un meilleur rapport qualité-prix.

Le besoin croissant et toujours plus exigeant des maîtres d'ouvrages concernant la surveillance des structures va donc de pair avec l'augmentation de leur dimension et nombre. La nécessité réside dans la capacité d'établir une cartographie complète et fiable du comportement mécanique d'une structure et du suivi de l'évolution de sa dynamique. Pour répondre à ces exigences réglementaires de surveillance, un large nombre de capteurs permettant la mesure des charges et facteurs environnementaux tels que la pression, les déplacements, la température, l'humidité et la corrosion sont utilisés. Dans ce contexte, CEMENTYS propose la technologie très innovante des CFOR . Cette dernière regroupe plusieurs techniques de mesures et constitue un outil majeur des stratégies de surveillance de la santé des constructions du génie civil.

Dans les méthodes d'auscultation dites traditionnelles, un grand nombre de capteurs ponctuels tels que des jauges de contrainte [1], des capteurs à corde vibrante [2] ou des sondes de température sont installés pour mesurer les profils de contrainte et de température de la structure pendant le bétonnage ou le durcissement. Ces méthodes présentent deux limitations majeures. Tout d'abord, elles sont ponctuelles (limitée à l'emplacement et au nombre des capteurs) là où la fibre et donc les CFOR sont continus. De plus, pour réaliser des mesures en profondeur et sur une distance importante, le déploiement des capteurs conventionnels est coûteux et parfois même impossible là où les CFOR sont moins limités.

## 2.2. La fibre optique comme capteur

L'utilisation de la détection par fibre optique dans le génie civil/géotechnique est une technologie relativement nouvelle qui doit son existence au développement antérieur du laser et de la fibre optique à faible perte, deux développements scientifiques des années 1960. Le moteur initial du développement de la fibre optique était les télécommunications. Au cours des décennies suivantes, divers groupes de recherche ont commencé à développer le concept d'utilisation des fibres optiques pour la production de technologies de détection et de mesure. Ces capteurs bénéficient de l'avantage des propriétés intrinsèques de la fibre optique (immunité électromagnétique, possibilité de multiplexage, déploiement sur de longues distances, tenue aux hautes températures et résistance à la corrosion et aux agressions chimiques). Ces recherches se sont poursuivies jusqu'à aujourd'hui et ont donné naissance à toute une série de techniques de détection par fibre optique dans des domaines d'application très variés. Parmi elles, il existe des capteurs à fibre optique réparti, exploitant les non-linéarités de la fibre qui sont liées à des diffusions de type Brillouin ou Raman, ce qui étend leur utilisation à de nombreux domaines tels que l'environnement, les transports, ou encore l'aéronautique [3].

La surveillance intelligente des structures est de plus en plus reconnue comme un outil essentiel pour améliorer les processus de construction, assurer l'efficacité et réduire les risques. Elle repose donc sur des capteurs à fibre optique performants, faciles à intégrer et peu coûteux.

## 3. INNOVATION

### 3.1. Principe des capteurs à fibre optique répartis

Lorsqu'on parle de CFOR, la fibre en elle-même constitue sur toute sa longueur l'élément sensible du capteur, ce qui permet de réaliser des mesures réparties d'un bout à l'autre de celle-ci, qui seront par la suite appliquées à la détection et à la localisation. Concernant le système en tant que tel, une impulsion laser infrarouge est lancée depuis une extrémité de la fibre optique

grâce à un interrogateur optique. Une petite portion de cette impulsion est renvoyée, ou rétrodiffusée successivement vers l'interrogateur, tout au long du parcours de l'impulsion (Figure 2).

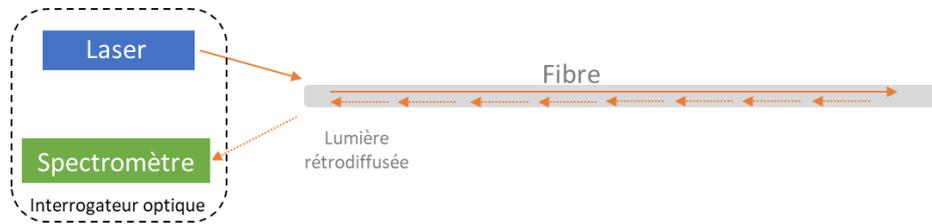


Figure 2: Configuration standard d'un système de capteur à fibre optique

A chaque instant, l'information rétrodiffusée depuis un point donné de la fibre est collectée à l'extrémité de la fibre et est analysée par l'interrogateur optique. La fibre optique est le seul élément sensible où les variations de la propagation guidée de la lumière sont exploitées. Il n'y a pas de signal électrique qui la traverse.

Trois types de rétrodiffusions de la lumière se créent lors de la propagation de l'impulsion dans la fibre. Les caractéristiques de chacune d'entre elles peuvent être exploitées pour effectuer différentes mesures (Figure 3).

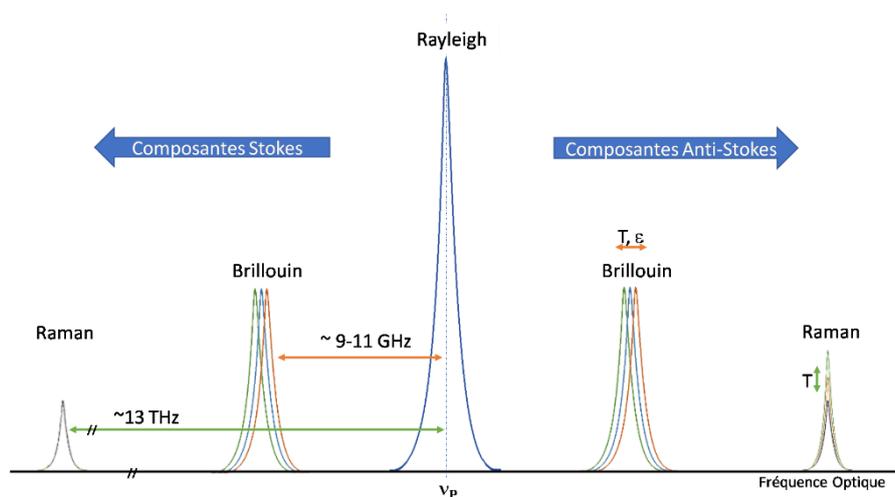


Figure 3: Spectre de rétrodiffusion dans une fibre optique en silice

Les capteurs de température répartis (DTS pour *Distributed Temperature Sensing*) sont des fibres optiques qui fournissent des mesures de température tout au long du parcours de l'impulsion laser et à tout moment. Leur technologie est basée sur le phénomène de diffusion Raman qui se produit à l'intérieur de la fibre. La mesure du signal rétrodiffusé Brillouin quant à elle (DTSS pour *Distributed Temperature and Strain Sensing*), nous renseigne simultanément sur les variations en température et en déformation. Enfin, les capteurs acoustiques répartis (DAS pour *Distributed Acoustique Sensing*) fournissent des mesures acoustiques et de température en se basant sur le phénomène de diffusion Rayleigh.

### 3.2. Le capteur à fibre optique réparti SensoLux TMA®

Le CFOR SensoLux TMA® est notre fibre optique de référence pour le monitoring (Figure 4). Celui-ci permet de réaliser à la fois, des mesures de déformation (DSS), de température (DTS) ou encore des mesures acoustiques (DAS/DVS).

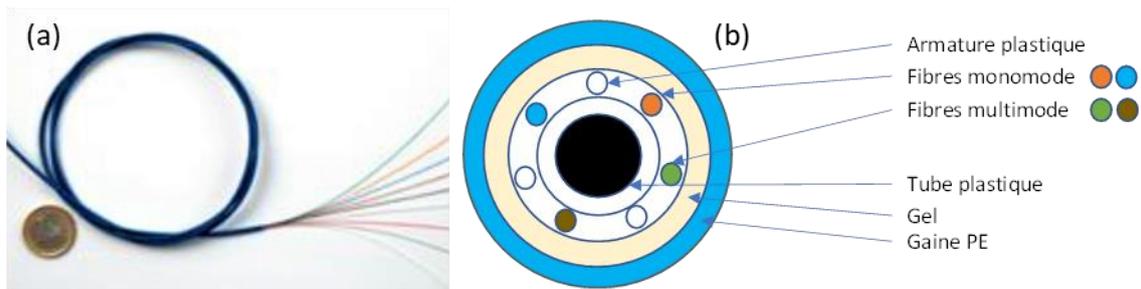


Figure 4: Capteur SensoLux TMA (a) et Schéma de la section de SensoLux TMA (b)

Le CFOR SensoLux TMA® est constitué de 4 fibres optiques standards, utilisées dans le domaine des télécommunications (2 UIT-G651 et 2UIT-G652) à l'intérieur d'un même câble afin d'assurer une grande polyvalence.

Comme toute fibre optique, la SensoLux TMA® est immunisée contre les surtensions (foudres) ou autres perturbations électromagnétiques. Elle est constituée de deux types de fibres à l'intérieur ; deux fibres multimodes (MM) et deux fibres monomodes (SM), permettant les mesures Brillouin et Raman sur le même câble. De plus, les fibres sont collées à l'intérieur du revêtement, ce qui permet un bon transfert des déformations et de la température, de la surface de pose vers la fibre optique.

### 3.3.Méthodologie de chantier

Un essai sur le terrain a été réalisé sur le chantier d'une future gare ferroviaire d'Ile-de-France pendant la construction d'une paroi moulée de près de 50 m de profondeur. L'évaluation de l'intégrité d'un des éléments de cage (cage C7c) de la paroi est basée sur l'installation de boucles de câble à CFOR SensoLux TMA® de CEMENTYS (Figure 5).

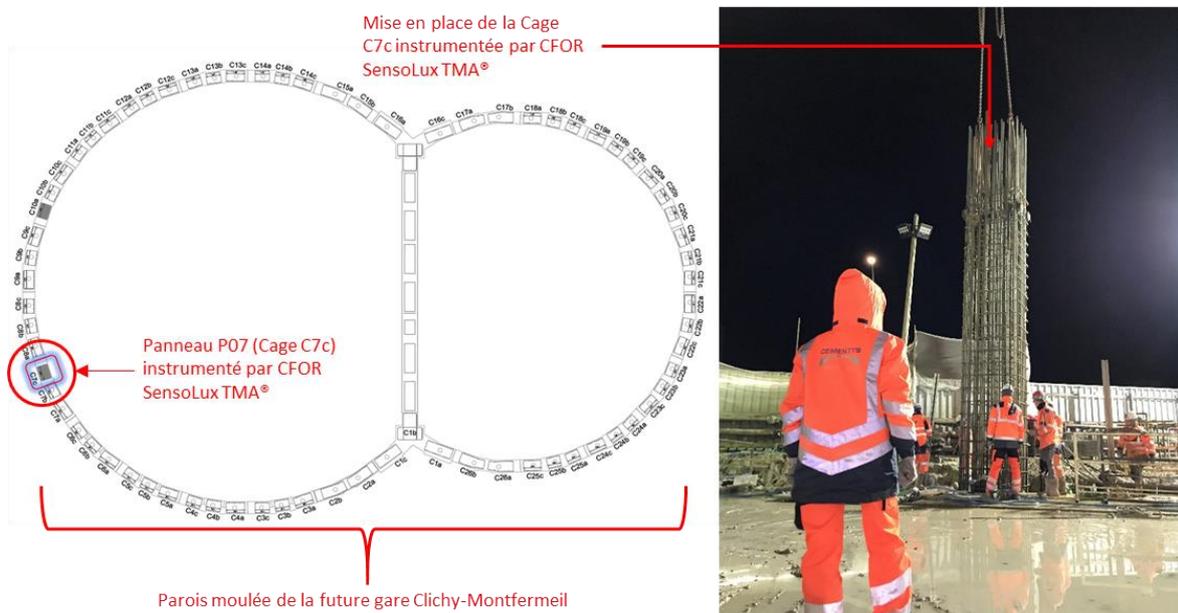


Figure 5: Plan de localisation du panneau P07 (cage C7c) instrumenté à la gare de Clichy-Montfermeil

La méthode d'installation du CFOR SensoLux TMA® sur la structure, dépend des exigences de surveillance et du type de structure à ausculter. Dans le cas de l'auscultation de la cage C7c (panneau P07) de la paroi moulée, trois boucles de câble à fibre optique SensoLux TMA® sont

installées sur les côtés et proche du centre de la cage afin d'avoir trois profils de mesures répartis (Figure 6 et 7).

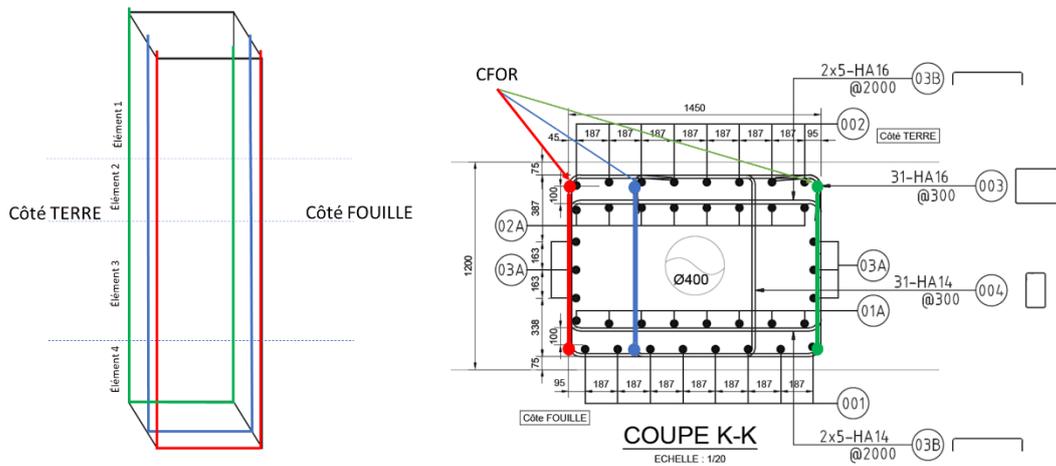


Figure 6. Plan d'installation de fibre optique sur la cage C7c



Figure 7: Photographie du CFOR SensoLux TMA installé sur la cage C7c

En raison de la profondeur de la paroi moulée, la cage d'armature est constituée de 4 éléments, qui ont été assemblés en série pendant l'installation. Il a été par conséquent difficile de fixer préalablement le câble à l'armature, sur toute la longueur de la cage. La fibre optique SensoLux TMA<sup>®</sup> a été d'abord installée sur l'élément de cage le plus en profondeur sur le sol, et fixée à l'armature par des liens autobloquants et du ruban adhésif à intervalle régulier. En déroulant les bobines de câble d'un seul tenant depuis l'élément de cage ausculté le plus en profondeur, le

câble a été ensuite fixé aux barres d'armature des autres éléments, au moment de la descente de la cage dans la fosse (Figure 7).

### 3.4. Résultats et avantages par rapport aux méthodes traditionnelles

La Figure 8 présente l'évolution de la température dans la paroi moulée versus la température mesurée par le CFOR SensoLux TMA® en extérieur, en fonction du temps. On y observe l'augmentation de la température dans la PM de 10 °C à 14,5 °C lors de la phase de bétonnage, celle-ci ayant pris fin le 17 février à 23h40. A partir du 18 février, la température augmente sensiblement en fonction du temps de prise du béton jusqu'à atteindre une température maximale relevée de 37,14 °C à la fin des mesures.

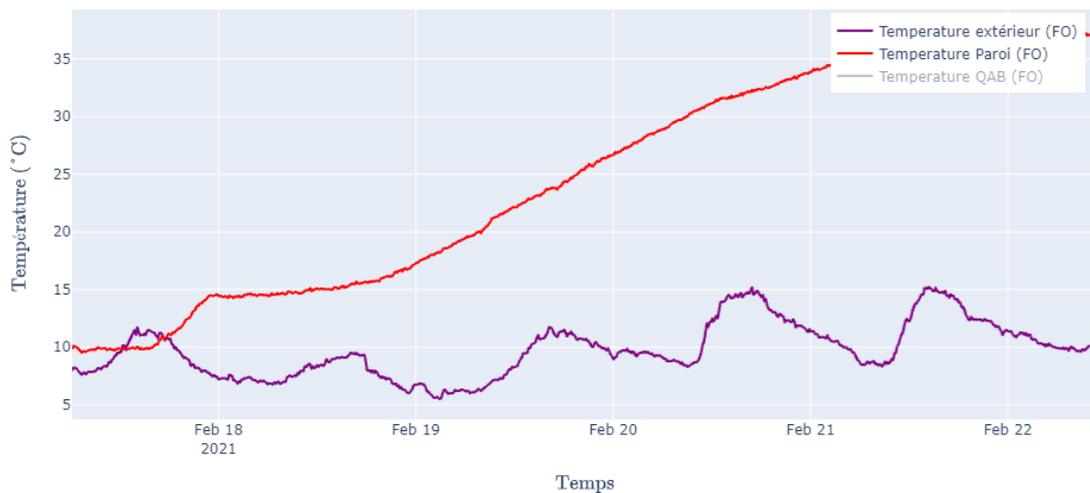


Figure 8: Evolution de la température en fonction du temps dans la paroi moulée

La Figure 9 illustre la variation temporelle de la température mesurée par capteur à fibre optique. Les valeurs de température comprises entre 100 m et 130 m et entre 220 m et 250 m correspondent aux températures extérieures tandis que les valeurs de température comprises entre 130 m et 220 m correspondent aux températures mesurées dans la paroi moulée.

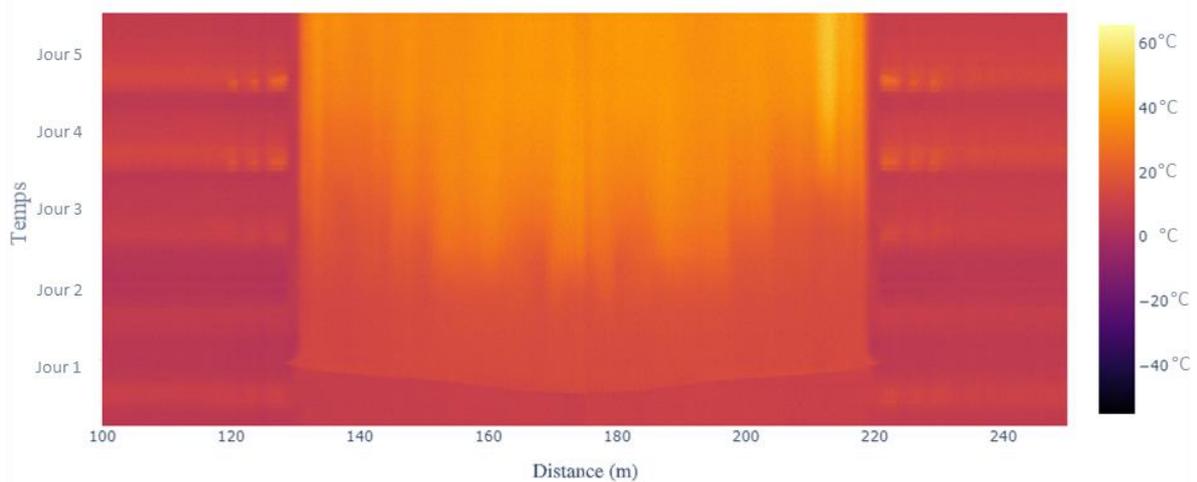


Figure 9: Spectrogramme de la température mesurée par le CFOR SensoLux TMA

La Figure 10 présente les variations de la fréquence Brillouin en début de mesure, (c-à-d à 6h05, avant bétonnage) et en fin de mesure (c-à-d à 21h35, pendant le bétonnage). Cette variation de la fréquence Brillouin mesurée par le CFOR SensoLux TMA® dans la paroi moulée nous renseigne sur la déformation longitudinale de la cage d'armature, comme présenté sur la Figure 11.

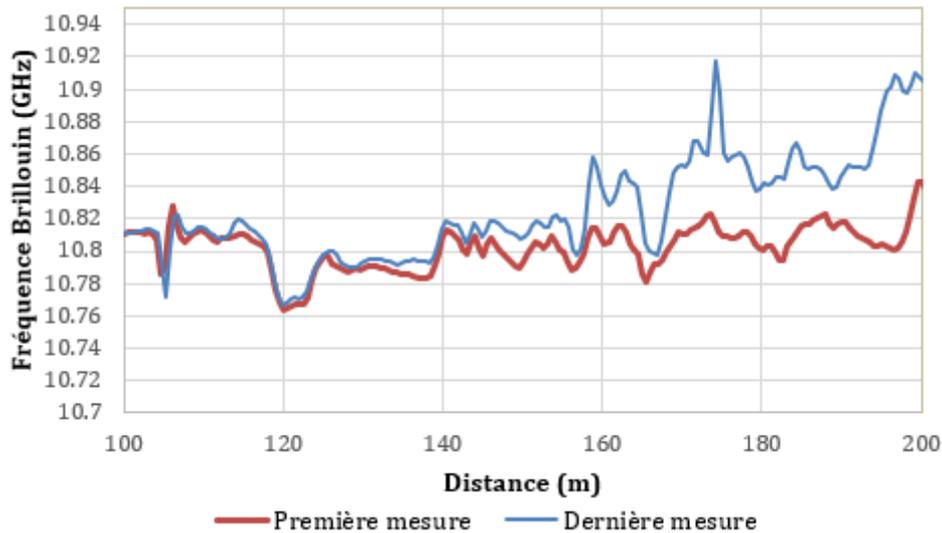


Figure 10. Fréquence Brillouin en début et fin de mesure

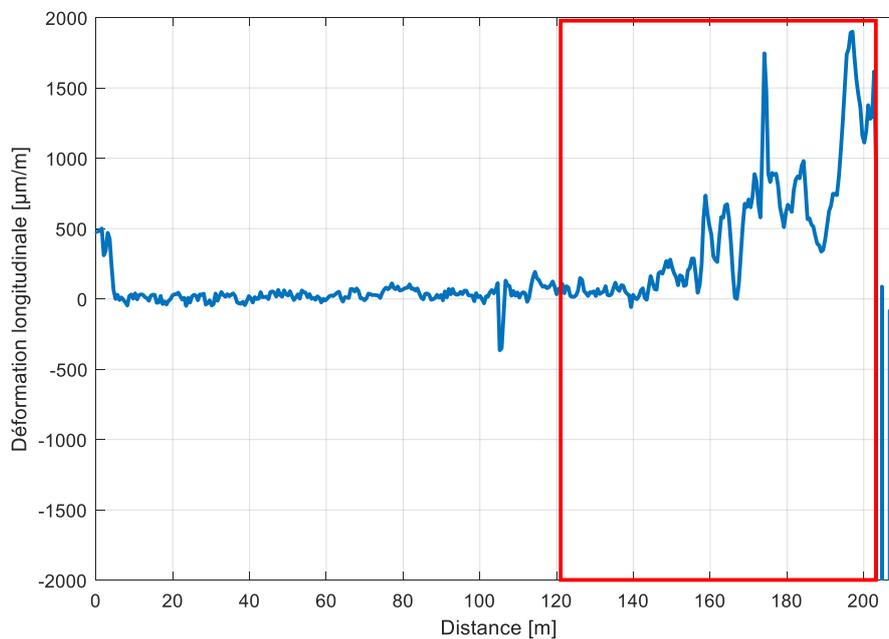


Figure 11: Déformation longitudinale dans la paroi moulée

Plusieurs études ont comparé des mesures de variation de température et des déformations acquises à l'aide de thermocouples ou de jauges de contrainte, et les résultats obtenus par les biais des CFOR [4]. L'efficacité des capteurs à fibre optique répartis par rapport à la technologie traditionnelle, est alors avérée particulièrement pour des longueurs de structures auscultées allant jusqu'à 120 km.

En plus de la fiabilité des mesures obtenues par CFOR, l'utilisation de la fibre comme capteur présente un certain nombre d'avantage :

- Aucune nécessité de systèmes d'acquisition de données multicanaux ;
- Dispositif peu encombrant ;
- Réduction des erreurs d'identification des points de mesure ;
- Une seule fibre est actuellement capable de produire deux informations cruciales, à savoir la température et la déformation. Ainsi un grand nombre de capteurs conventionnels peut être remplacé par un seul capteur à fibre optique pour fournir les mêmes informations.
- Réduction des coûts en multiplexant un certain nombre d'éléments de détection sur une seule fibre ;
- En cas de dommage sur la structure auscultée, la fibre endommagée permet une localisation plus rapide du point de défaillance ;
- Immunité contre les interférences électromagnétiques tandis que les thermocouples conventionnels sont généralement sujets à des problèmes d'induction électromagnétique.

## 4. REFERENCES

- [1].J-L. Le Goër and J. Avril. Capteurs à jauges extensométriques. Techniques de l'ingénieur Mesures de longueurs et d'angles, base documentaire : TIB408DUO. (ref. ARTICLE : r1860), 1992.
- [2].L. Wang, D. Zhang, and Y. Zhang. Research on vibrating string transducer used in online monitoring system of tailings dam. In 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), pages 1690–1693, July 2017.
- [3]. A. H. Hartog. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. Series in fiber optic sensors, CRC Press Taylor and Francis Group, Florida, 2017.
- [4].S Cherukupalli; G. J. Anders, "Distributed Fiber Optic Sensing," in Distributed Fiber Optic Sensing and Dynamic Rating of Power Cables, IEEE, 2020, pp.20-25, doi: 10.1002/9781119487739.ch2.

## 5. ANNEXES

### 5.1. Projets similaires avec CFOR SensoLux TMA®



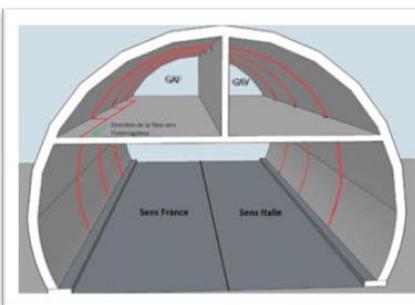
Old Oak Common Station : Mesure répartie de déformation et température par CFOR SensoLux TMA® . Royaume Uni - 2021.



Prolongement Ligne 12 (RATP) : Mesure répartie de déformation et température par CFOR SensoLux TMA® . France - 2016-2018.



Tunnel de Fréjus (SFTRF) : Mesure répartie de déformation. France - 2015-2016.



Tunnel de Fréjus (SFTRF) : Mesure répartie de déformation. France - 2015-2016..

## 5.2.Fiche technique CFOR SensoLux TMA®



# SENSOLUX TMA®

## FIBRE OPTIQUE POUR MESURE DISTRIBUÉE

### UNE FIBRE OPTIQUE MULTITÂCHE

La *SensoLux TMA®* est notre fibre de référence pour le monitoring. Celle-ci permet de réaliser des mesures de déformation, de température ou encore des mesures acoustiques. La polyvalence de cette fibre et sa capacité à réaliser différentes mesures sont ses principaux atouts.

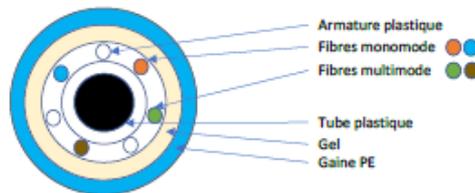
Grâce à cette technologie, il est possible de faire des mesures distribuées dans des environnements industriels et difficiles.

Son petit diamètre, sa bonne résistance à la traction combinés à son faible rayon de courbure lui confèrent une robustesse et une grande facilité de déploiement.

Elle est ainsi constituée de 4 fibres optiques standards utilisées dans le domaine des télécommunications (2 UIT-G651 et 2 UIT-G652) à l'intérieur d'un même câble afin d'assurer une grande polyvalence. Différentes gaines offrent une certaine solidité de cette fibre pour des environnements difficiles. La fibre optique *SensoLux TMA®* est immunisée contre les surtensions (foudres) ou autres perturbations électromagnétiques et possède une sécurité intrinsèque (EMI/RFI).

### APPLICATIONS

- Suivi des déformations dans tout type d'environnement (DSS).
- Suivi des vibrations dans les ouvrages (DAS/DVS).
- Suivi de contrôle de la température (DTS).
- Surveillance des structures sensibles



### STRUCTURES CONCERNÉES



## PRINCIPE DE MESURE

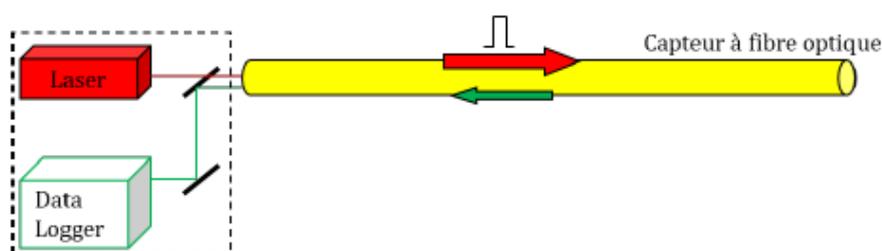


Figure 1 : Principe d'interrogation du capteur SensoLux TMA®

Le principe de la mesure « répartie » consiste en la possibilité à accéder à une mesure en toute zone du câble. Un flash infrarouge émis par un Laser est envoyée à une extrémité de la fibre optique. Une fraction de ce flash est « rétrodiffusée » (réflexion diffuse) successivement tout au long de son parcours. À un instant donné, l'information provenant d'un point donné de la fibre revient à l'extrémité de la fibre et est analysé par le système d'interrogation autonome (DataLogger®). Suivant le choix de ce système, le capteur à fibre optique SensoLux TMA® permet de mesurer la température (SensLogger T®) et/ou les déformations (SensLogger S®).

## CARACTERISTIQUES

Fibre optique	SensLux TMA®	
Type	DSS DTS DAS	
No. De fibres	2 fibres monomode G652 2 fibres multimode G651	
Atténuation maximale	Monomode	≤0,03 dB/km (à 1310 nm) ≤0,02 dB/km (à 1550 nm)
	Multimode	≤2,3 dB/km (à 850 nm) ≤0,6 dB/km (à 1300 nm)
Indice de réfraction	Monomode	1,4674 (à 1310 nm) 1,4679 (à 1550 nm)
	Multimode	1,482 (à 850 nm) 1,477 (à 1300 nm)
Diamètre	2 mm	
Poids du câble	58 kg/km	
Tension maximale d'installation	6,2 kN	
Tension (post-installation)	6,2 kN	
Rayon de courbure minimum	5,46 cm	
Rayon de courbure minimum sous tension	5,46 cm	
Résistance à l'écrasement	1550 N/cm	
Température d'utilisation	De -180°C à 200°C	
Conditions d'utilisation	Structures à grande échelle (kilométriques), Environnement à rayonnement électromagnétique, Environnements explosifs.	
Portée de la mesure	De 100 m jusqu'à 50 km	
Etendue de mesure en déformation	De -2% (compression) à 1% (traction)	

Résolution spatiale	8 cm en utilisant le <i>SensoLogger S<sup>®</sup></i> 1 m en utilisant le <i>SensoLogger T<sup>®</sup></i>
Résolution en déformation	20 $\mu\epsilon$
Résolution en température	0,1 °C
Temps de réponse	De 1 min à plusieurs heures pour le <i>SensoLogger S<sup>®</sup></i> De 15 sec à 10 min (personnalisable) pour le <i>SensoLogger T<sup>®</sup></i>