



**HAL**  
open science

## Analyse vibratoire à partir d'extensomètres à fibre optique longue base

Gwendal Cumunel, Pierre Argoul, Sylvie Delepine-Lesoille

► **To cite this version:**

Gwendal Cumunel, Pierre Argoul, Sylvie Delepine-Lesoille. Analyse vibratoire à partir d'extensomètres à fibre optique longue base. Mesures et Techniques Optiques pour l'Industrie, Nov 2013, Orléans, France. hal-01799991

**HAL Id: hal-01799991**

**<https://hal.science/hal-01799991v1>**

Submitted on 25 May 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Analyse vibratoire à partir d'extensomètres à fibre optique longue base

Gwendal Cumunel, Pierre Argoul, Sylvie Delepine-Lesoille <sup>(1)</sup>

Université Paris-Est, Laboratoire Navier (ENPC/IFSTTAR/CNRS), Ecole des Ponts ParisTech  
6&8 Avenue Blaise Pascal, Champs-sur-Marne, F77455 Marne la Vallée Cedex 2

(1) ANDRA

Parc de la Croix Blanche 1/7 rue Jean Monnet 92298 Chatenay-Malabry

## 1. Introduction

La surveillance d'ouvrages d'art est un domaine actif de la recherche, cependant la mise en place in-situ de l'instrumentation peut s'avérer fastidieuse et coûteuse. En effet, équiper une structure de plusieurs dizaines de mètres nécessite des dizaines de capteurs, auxquels il faut rajouter le coût de maintenance. D'autres solutions utilisant moins de capteurs sont souvent préférées. Par exemple, quelques capteurs servant de référence sont fixes et les autres sont déplacés sur l'ensemble de la structure étudiée. Le nombre de capteurs étant réduit, le choix de leur placement peut devenir délicat [1]. Une alternative à ce problème est l'utilisation d'Extensomètres de Longues Bases de mesure (ELB) [2]. Réalisés à partir de fibres optiques, ces capteurs permettent de mesurer des variations de la distance entre des points espacés de plusieurs mètres tout en conservant une résolution de l'ordre du  $\mu\text{m}$ . Ils sont principalement utilisés pour la surveillance des ouvrages à long terme [3] mais aussi, plus récemment, pour l'étude du comportement dynamique des structures [4]. Depuis quelques années, une évolution a permis de les attacher continûment aux structures soit par collage, soit en les noyant au cœur du matériau [5]. Nous appellerons par la suite ce type de capteur les Extensomètres Longue Base Continument Attachés (ELB-CA) aux structures.

Dans un premier temps, le système de mesure optique ainsi que le capteur sont présentés. Ensuite, l'expression de la mesure obtenue par ce type de capteur est introduite et appliquée aux cas des poutres et des plaques minces. Enfin, les notions de « nœud » et de « ventre » de vibrations sont présentées pour ce type capteur.

## 2. Système de mesure optique

Le capteur à fibre optique (Cf. Figure1) est constitué d'une Fibre Optique (FO) monomode comportant une cavité Fabry-Pérot réalisée en inscrivant, par aboutement de deux FO traitées, deux miroirs semi-réfléchissants dans la fibre. L'interrogateur optique permet de mesurer la différence de chemin optique entre les ondes réfléchies par les miroirs partiels inscrits dans la FO de mesure, constituant le capteur.

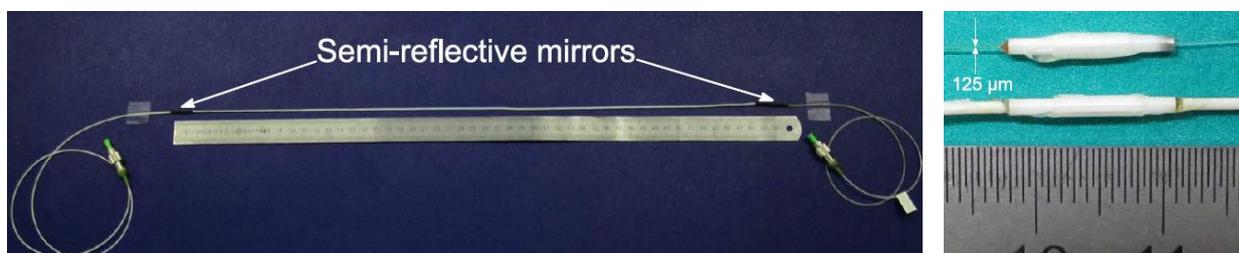


Figure 1

(a) Capteur gainé de 50 cm de longueur;

(b) Miroir semi-réfléchissant dans une fêrulle (fibre optique gainée et non gainée).

La lumière émise par la diode laser (SLED, Cf. Figure2) est séparée par un coupleur. Une partie illumine le capteur ou bras de mesure. La partie de la lumière diffusée dans le bras de mesure subit plusieurs réflexions partielles lors de son trajet dans la fibre de mesure : une au niveau de chacun des miroirs semi-réfléchissants. La lumière réfléchiée est envoyée dans la ligne à retard composée du bras

de référence et du bras mesurant. Le déplacement du miroir du bras mesurant, monté sur un étage mobile balayant une distance de  $4\text{ mm}$  à une fréquence de  $50\text{ Hz}$ , permet de mettre en phase les signaux réfléchis provenant du bras de mesure et du bras de référence, qui sont recombinaés sur un photodétecteur. Quand le temps de décalage (*i.e.* la phase) entre les deux réflexions au niveau des miroirs du capteur est reproduit dans la ligne à retard, un pic d'interférence apparaît. Connaissant précisément la position du miroir, la longueur de la cavité peut alors être déterminée.

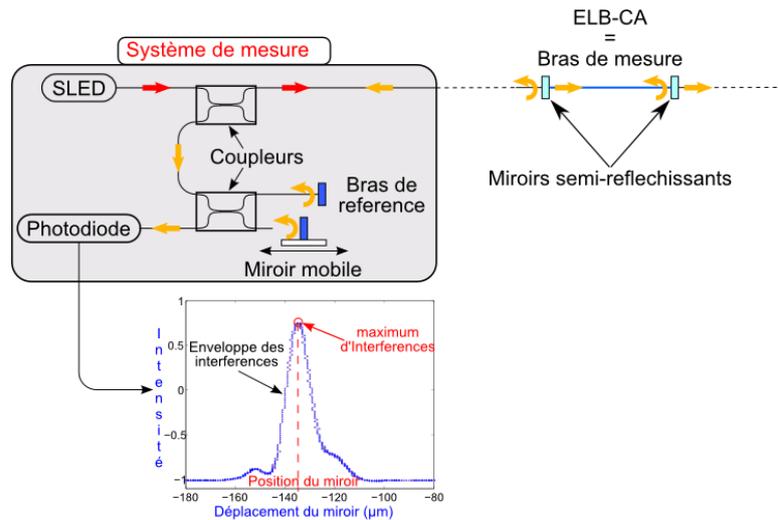


Figure 2

Schéma de principe de l'interrogateur optique

L'acquisition des signaux de déplacement du miroir et de l'intensité de la lumière reçu par la photodiode est réalisée par une carte NI avec une fréquence d'échantillonnage de  $5\text{ MHz}$ . La fréquence d'échantillonnage est élevée afin d'obtenir une bonne détection de l'enveloppe des pics d'interférence. Le signal de déplacement du miroir est un signal quasi-triangulaire avec une fréquence de  $50\text{ Hz}$ . Au cours d'une période, composée d'une rampe montante et d'une rampe descendante, deux pics d'interférences se produisent pour un capteur. Pour une rampe, le déplacement est de  $4\text{ mm}$  ( $\pm 2\text{ mm}$ ) ce qui correspond à  $50\,000$  points de mesure et donc à une précision de  $80\text{ nm}$  pour la détection temporelle de l'enveloppe de la figure d'interférence. La précision spatiale du système de mesure, celle qui nous intéresse, est limitée à  $1\text{ }\mu\text{m}$  en raison de la précision de la position du miroir. Cette valeur peut être légèrement améliorée numériquement (détection du maximum de l'enveloppe de la figure d'interférence). Par conséquent, le niveau de bruit de mesure de l'unité de lecture est d'environ  $0,7\text{ }\mu\text{m}$ , indépendamment de la longueur du capteur.

En raison de la longueur de cohérence de la source lumineuse, la figure d'interférences fait quelques dizaines de microns de large et comprend donc plusieurs centaines de points de mesure, qui sont utilisés afin d'obtenir l'enveloppe des interférences et d'en déterminer le maximum.

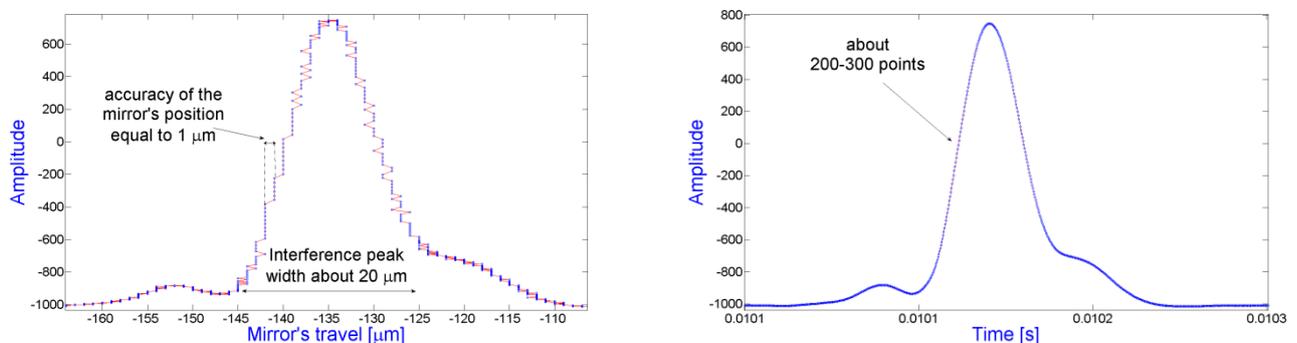


Figure 3

Précision spatiale (à gauche) et temporelle (à droite) du système de mesure optique

### 3. Mesure réalisée par un ELB-CA

La FO étant un guide d'onde, l'ELB-CA permet de mesurer la distance entre deux points particuliers le long de la FO. D'après le principe de Fermat, la mesure réalisée par l'ELB-CA est définie par :

$$L_{\text{opt}}(s_a, s_b, t) = \int_{s_a}^{s_b} n(t) ds(t)$$

où  $n(t)$  est l'indice de réfraction,  $s_a$  et  $s_b$  les abscisses curvilignes respectives des extrémités du capteur.

Un modèle détaillé de la mesure réalisée par ce type de capteur est présenté dans [6], notamment l'application au cas des poutres d'Euler-Bernoulli. De part sa mesure longue base, les notions classiques en analyse vibratoire pour le placement des capteurs, concernant les nœuds et ventres de vibrations, ne sont plus aussi évidentes pour les ELB-CA. Nous présenterons également l'application de la mesure au cas des plaques minces pour deux configurations simples de capteur.

### 4. Application: Flexion d'une poutre d'Euler-Bernoulli

Pour les vibrations de flexion transverse d'une poutre dans le plan  $(O, x, y)$ , avec les hypothèses cinématiques d'Euler-Bernoulli, la variation d'abscisse curviligne s'exprime classiquement par :

$$ds = \sqrt{1 + 2\varepsilon_{xx}} dx$$

D'après [2], l'indice de réfraction vaut :

$$n = \frac{n_0}{\sqrt{1 + n_0^2[-\nu p_{11} + (1 - \nu)p_{12}] \varepsilon_{xx}}}$$

d'où, pour un ELB-CA situé entre  $x = a$  et  $x = b$

$$L_{\text{opt}}(a, b, t) = \int_a^b \frac{n_0}{\sqrt{1 + n_0^2[(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}] \varepsilon_{xx}}} \cdot \sqrt{1 + 2\varepsilon_{xx}} dx$$

avec  $\varepsilon_{xx}$  la déformation axiale subie par la fibre,  $n_0 = 1.46$  l'indice de réfraction de la FO (silice),  $\nu = 0.25$  le coefficient de Poisson de la FO,  $p_{11} = 0.12$  et  $p_{12} = 0.27$  les constantes photoélastiques de la FO [7]. Les détails sur la détermination de ces expressions sont donnés dans [6].

### 5. Application: Flexion d'une plaque de Love-Kirchhoff

Pour les vibrations de flexion transverse d'une plaque mince, donc avec les hypothèses cinématiques de Love-Kirchhoff, nous n'exposerons ici que deux configurations de capteurs par souci de simplicité: parallèle à l'axe  $Ox$  ou  $Oy$ .

Pour un capteur placé parallèlement à l'axe  $Ox$ , nous retrouvons un résultat semblable à celui obtenu pour la poutre:

$$L_{\text{opt}}(x_1, x_2, y, t) = \int_{x_1}^{x_2} \frac{n_0}{\sqrt{1 + n_0^2[(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}] \varepsilon_{xx}}} \cdot \sqrt{1 + 2\varepsilon_{xx}} dx$$

Pour un capteur placé parallèlement à l'axe  $Oy$ , nous avons:

$$L_{\text{opt}}(x, y_1, y_2, t) = \int_{y_1}^{y_2} \frac{n_0}{\sqrt{1 + n_0^2[(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}] \varepsilon_{yy}}} \cdot \sqrt{1 + 2\varepsilon_{yy}} dy$$

## 6. Hypothèses simplificatrices

Pour le cas de la poutre, sous l'hypothèse classique des petites déformations ( $\varepsilon_{xx} \ll 1$ ), des développements limités au premier ordre des expressions introduites en 4 permettent d'obtenir :

$$\begin{aligned} ds &\approx (1 + \varepsilon_{xx}) dx \\ n &\approx n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 [(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}] \varepsilon_{xx} = n_0 + n_\varepsilon \end{aligned}$$

avec  $n_\varepsilon = -\frac{1}{2} n_0^3 [(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}] \varepsilon_{xx} = \kappa \varepsilon_{xx}$  étant une constante égale à  $-0.19$ .

Il vient alors :

$$\Delta L_{\text{opt}}(a, b, t) \approx (n_0 + \kappa) \int_a^b \varepsilon_{xx} dx = 1.27 \cdot \Delta L_{\text{AB}}(a, b, t)$$

avec  $\Delta L_{\text{opt}}(a, b, t) = L_{\text{opt}}(a, b, t) - L_{\text{opt}}(a, b, 0)$ ,  $L_{\text{opt}}(a, b, 0) = n_0(b - a)$  et  $L_{\text{AB}}(a, b, 0) = b - a$ .

En petites déformations, la variation de longueur optique est égale à la variation de longueur physique à une constante multiplicative près. Le même résultat est obtenu pour le cas de la plaque où les capteurs sont placés parallèlement à l'axe  $Ox$  ou  $Oy$ . Dans la suite, nous nous intéresserons donc seulement au calcul de  $\Delta L_{\text{AB}}(a, b, t)$ . Notons que l'écart entre ces deux grandeurs est de l'ordre de 27 %.

## 7. Réponse à un impact

L'analyse modale est une théorie fondée sur la linéarité du comportement des systèmes. Pour la poutre, le domaine linéaire est celui des petites déformations et des petites rotations. Dans ce cas, la mesure obtenue par l'ELB-CA vaut :

$$\Delta L_{\text{AB}}(a, b, t) = -y \int_a^b \partial^2 v(x, t) / \partial x^2 dx$$

Le déplacement transverse d'une poutre soumise à un impact est donné classiquement par superposition modale [4], il vient alors :

$$\Delta L_{\text{AB}}(a, b, t) \approx -y \sum_{k=1}^N b_k(t) \left( \int_a^b \partial^2 \phi_k(x) / \partial x^2 dx \right) \approx -y \sum_{k=1}^N b_k(t) \Phi_k(a, b)$$

avec  $b_k(t)$  la réponse à la force d'excitation,  $\phi_k(x)$  les déformées modales de la poutre et  $\Phi_k(a, b) = \int_a^b \phi_k''(x) dx = \phi_k'(b) - \phi_k'(a)$  l'intégrale de la courbure modale.

Cette formule liant la mesure de l'ELB-CA à la courbure modale a motivé plusieurs équipes à travailler sur les méthodes de détection d'endommagements et notamment celle basée sur la courbure modale [8].

Pour le cas de la plaque avec un capteur parallèle à l'axe  $Ox$ , nous avons:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{AB}}(x_1, x_2, y, t) &= -z \int_{x_1}^{x_2} \partial^2 w(x, y, t) / \partial x^2 dx \\ &\approx -z \sum_{k=1}^N b_k(t) \left( \int_{x_1}^{x_2} \partial^2 \psi_k(x, y) / \partial x^2 dx \right) \approx -z \sum_{k=1}^N b_k(t) \Psi_k(x_1, x_2, y) \end{aligned}$$

avec  $\Psi_k(x_1, x_2, y) = \psi_k'(x_2, y) - \psi_k'(x_1, y)$

Pour un capteur parallèle à l'axe  $Oy$ , il vient:

$$\Delta L_{AB}(x, y_1, y_2, t) = -z \int_{y_1}^{y_2} \partial^2 w(x, y, t) / \partial y^2 dy$$

$$\approx -z \sum_{k=1}^N b_k(t) \left( \int_{y_1}^{y_2} \partial^2 \psi_k(x, y) / \partial y^2 dy \right) \approx -z \sum_{k=1}^N b_k(t) \Psi_k(x, y_1, y_2)$$

avec  $\Psi_k(x, y_1, y_2) = \psi'_k(x, y_2) - \psi'_k(x, y_1)$

## 8. Nœuds de vibration pour un ELB-CA

Un nœud de vibration est un point fixe caractéristique d'un mode d'une structure. Positionner un capteur à un nœud permet de réaliser du filtrage modal puisque le mode ne sera pas présent dans la réponse. Cette notion est différente pour les ELB-CA et se comprend aisément pour le cas des poutres à partir de l'expression  $\Phi_k(a, b) = \phi'_k(b) - \phi'_k(a)$  où  $a$  et  $b$  sont les extrémités du capteur.

Pour filtrer le mode, il suffit de choisir les bornes du capteur de manière à annuler  $\Phi_k(a, b)$ , autrement dit choisir deux points tel que  $\phi'_k(b) = \phi'_k(a)$ . La Figure 2 présente  $\phi'_1(x)$  et  $\phi'_2(x)$  pour une poutre bi-encastée et une configuration d'ELB-CA (placement et longueur) permettant de filtrer chacun des deux modes.

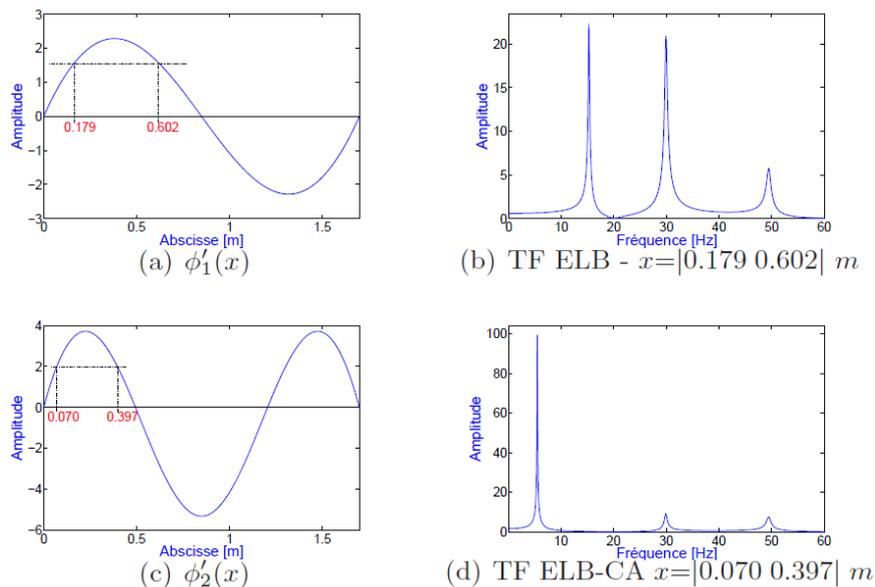


Figure 4

Exemple de configurations d'ELB-CA permettant de filtrer l'un des deux premiers modes d'une poutre bi-encastée : (a) premier mode filtré, (c) deuxième mode filtré.

La Figure 2 permet de montrer l'existence d'une multitude de positions et de longueurs associées permettant de filtrer chacun des modes. Par exemple sur la Figure 4(c), pour  $\phi'_2(x) = 2$ , deux autres abscisses que celles déjà indiquées sur le graphe sont possibles. Il y a donc six configurations d'ELB-CA permettant de filtrer ce mode. La variation de la valeur choisie ( $\phi'_2(x) = cst$ ) induit un nombre de configurations possibles très important. Ce n'est pas du tout le cas pour les capteurs ponctuels, où il n'y a que quelques nœuds par modes. L'ELB-CA possède donc des capacités de filtrage modal très riche. Pour le cas des plaques, cela sera d'autant plus vrai qu'il y a une dimension supplémentaire.

## 9. Ventres de vibration pour un ELB-CA

Un ventre est défini par un maximum au niveau d'un mode d'une structure. Pour l'ELB-CA, un maximum modal sera défini par une configuration de l'ELB-CA permettant de maximiser  $\Phi_k(a, b)$ . Il faut donc que l'intégrale de la courbure modale soit maximale. Pour cela, les paramètres à optimiser

sont les bornes d'intégration, c'est-à-dire la configuration de l'ELB-CA. Pour la poutre, il est évident que la position du capteur est alors celle située entre deux extremums de  $\phi'_k(x)$  : une extrémité à un maximum et l'autre à un minimum. Plus le mode sera élevé, plus il y aura de configurations possibles. Pour le cas des plaques, étant donné que les formes modales sont plus complexes, il est possible qu'il faille choisir une autre configuration de capteur (oblique par exemple) que celles présentées dans l'article pour obtenir un maximum modal.

## 10. Conclusion

Un système de mesure optique, basée sur l'interférométrie à faible cohérence, a été présenté ainsi qu'un capteur à fibre optique de longue base de mesure. Le principe de mesure du dispositif optique n'est pas nouveau mais a été adapté pour fournir des mesures dynamiques. Les caractéristiques de l'appareil de mesure optique sont une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz (fixe), une plage de mesure de 4 mm (entre  $\pm 2$  mm) et une précision d'environ 0,7  $\mu\text{m}$  quelle que soit la longueur du capteur.

Afin d'améliorer les capacités de ce type de capteur pour la surveillance des ouvrages, certains aspects de la mesure peuvent être améliorés telles que la fréquence d'échantillonnage et le procédé de fabrication du capteur. Les premiers essais réalisés avec les ELB-CA pour l'analyse vibratoire des structures sont plutôt encourageants, mais le système a encore besoin de quelques améliorations pour gagner en fiabilité.

Comme l'intégrale de la courbure modale entre les extrémités du capteur peut être obtenue directement par les ELB-CA, la principale application de ce type de capteur sera la détection d'endommagement par les méthodes utilisant les courbures modales (méthodes de la courbure modale, de la courbure de flexibilité, de l'énergie de déformation, ...).

## 11. Bibliographie

1. M. MEO, G. ZUMPARO, "On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure," Eng. Structures, vol. 27, pp 1488-1497, 2005
2. Y. ZHAO, F. ANSARI, "Quasi-distributed fiber-optic strain sensor: principle and experiment," Appl. Opt., vol 40, pp 3176-3181, 2001
3. D. INAUDI, S. VURPILOT, "Monitoring of Concrete Bridges with Long-Gage Fiber optic Sensors," J. Intell. Mtals. Sys. Struct., vol. 10, pp 280-292, 1999
4. G. CUMUNEL, S. DELEPINE-LESOILLE, P. ARGOUL et T.M. NGUYEN, « Les extensomètres longue base souples continûment attachés (ELB-CA), capteurs pour l'analyse vibratoire des structures », Mécaniques & Industries, vol. 8, pp 515-527, 2007
5. S. DELEPINE-LESOILLE and AL., "Quasi-distributed optical fibre extensometers for continuous embedding into concrete: design and realization," Smart Materials and Structures, vol. 15, pp 931-938, 2006
6. G. CUMUNEL, S. DELEPINE-LESOILLE, P. ARGOUL, "Long-gage optical fiber extensometers for dynamic evaluation of structures," Sensors and Actuators A, vol. 184, pp 1-15, 2012
7. F. ANSARI, Y. LIBO Y., "Mechanics of Bond and Interface Shear Transfer in optical Fiber Sensors," Journal of Engineering Mechanics, vol. 124(4), pp 385-394, 1998
8. D. ZONTA, M. POZZI, M. FORTI, P. ZANON, "Vibration-based condition monitoring of smart prefabricated concrete elements," Key Engineering Materials, vol. 293-294, pp. 743-750, 2005