

Extensomètres à fibre optique Longue Base pour l'évaluation dynamique des structures

G. Cumunel^a, P. Argoul^a

a. Université Paris-Est, Laboratoire Navier (ENPC/IFSTTAR/CNRS), Ecole des Ponts ParisTech, 6 & 8 av Blaise Pascal, 77455 Marne-la-Vallée, France.

Résumé :

L'article présente les capacités d'un nouveau capteur à fibre optique pour l'évaluation dynamique des structures : l'Extensomètre à fibre optique de Longue Base de mesure Continûment Attaché. Un modèle analytique de la mesure du capteur est proposé et appliqué aux vibrations de flexion des poutres d'Euler-Bernoulli. Les notions de « ventres » et « noeuds » de vibrations sont ensuite définies pour ce type de capteur. Enfin, une analyse modale expérimentale réalisée sur une poutre encastree-libre illustre les caractéristiques de la mesure obtenue à partir de ces extensomètres.

Abstract :

The article deals with the capacities of a new type of fiber optic sensor for dynamic structural monitoring : Continuously Attached Long-Gage fiber optic Extensometer. An analytical model of the sensor measurement is presented and applied to the flexural vibrations of Euler-Bernoulli beams. Then, concepts of vibration « nodes » and « anti-nodes » are defined for this type of sensor. Finally, experimental modal analysis is performed on a clamped-free beam to illustrate properties of these extensometers measurement.

Mots clefs : dynamique des structures ; extensomètres longue base ; analyse modale

1 Introduction

La surveillance d'ouvrages d'art est un domaine actif de la recherche, cependant la mise en place sur ouvrages de l'instrumentation peut s'avérer fastidieuse et coûteuse. En effet, équiper une structure de plusieurs dizaines de mètres nécessite des dizaines de capteurs [9], 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 être sensible [11, 14]. Une alternative à ce problème est l'utilisation d'Extensomètres de Longues Bases de mesure (ELB) [7, 15]. 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 μm . Ils sont principalement utilisés pour la surveillance des ouvrages à long terme [6, 8] mais aussi, plus récemment, pour des études dynamiques [8, 13]. Depuis quelques années, une évolution a permis de les attacher continûment aux structures soit par collage, soit en les noyant au coeur du matériau [2, 5]. Nous appellerons ce type de capteur les Extensomètres Longue Base Continûment Attachés (ELB-CA) aux structures.

Dans la première partie de l'article, le système de mesure optique utilisé pour la validation expérimentale est présenté. Ensuite, l'expression de la mesure obtenue avec l'ELB-CA est introduite et appliquée aux vibrations de flexion des poutres d'Euler-Bernoulli. Après simplifications, les notions de « noeuds » et de « ventres » de vibrations sont présentées pour ce type de capteur. Enfin, une analyse modale expérimentale est réalisée sur une poutre encastree-libre (E-L) pour valider la mesure des ELB-CA.

2 Système de mesure optique

Le capteur à fibre optique est constitué d'une Fibre Optique (FO) monomode comportant une cavité Fabry-Pérot réalisée en inscrivant, par abouttement de deux FO traitées, deux miroirs semi-réfléchissants dans la fibre.

L'appareil FOGALE permet de mesurer la différence de chemin optique entre les ondes réfléchies par les miroirs partiels inscrits dans la FO de mesure ou « capteur ». La lumière émise par la SLED (Fig.1) 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 réfléchie 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, permet de remettre 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 [1, 12]. Connaissant précisément la position du miroir, la longueur de la cavité peut alors être déterminée.

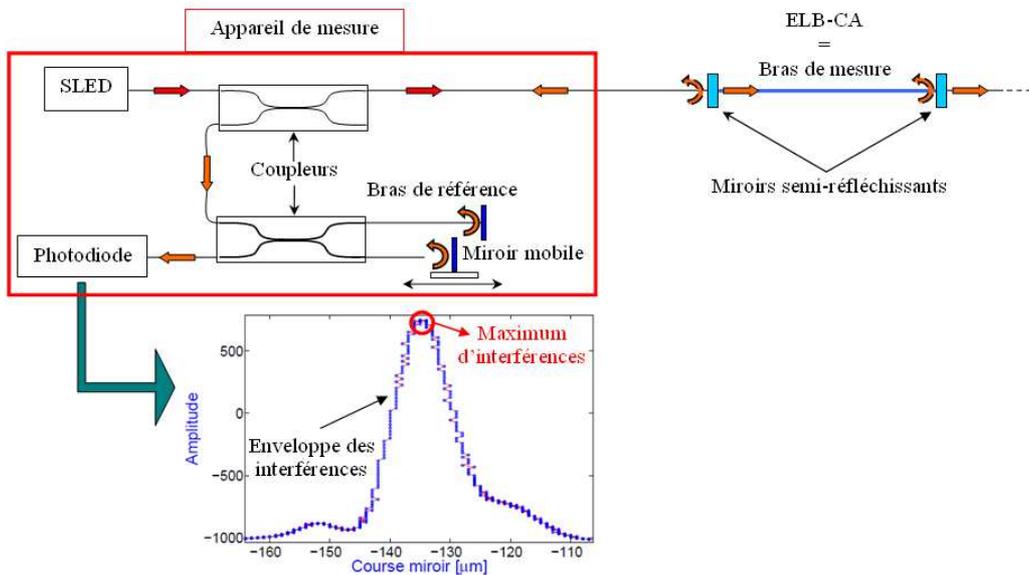


FIGURE 1 – Schéma de principe de l'interrogateur optique.

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 [12], la mesure réalisée par l'ELB-CA est définie par :

$$D_{opt}(t) = \int_{s_a}^{s_b} n ds \quad (1)$$

où n est l'indice de réfraction, s_a et s_b les abscisses curvilignes respectives des extrémités du capteur. $D_{opt}(t)$ est une longueur optique. La longueur physique $D_{AB}(t)$ est égale à $D_{AB}(t) = \int_{s_a}^{s_b} ds$.

3.1 Application : flexion d'une poutre d'Euler-Bernoulli

L'exemple d'application choisi pour l'étude de la mesure de l'ELB-CA concerne les vibrations de flexion transverse d'une poutre dans le plan (O, x, y) avec les hypothèses cinématiques d'Euler-Bernoulli.

Dans ce cas, la variation d'abscisse curviligne s'exprime classiquement par :

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

D'après [15], l'indice de réfraction vaut :

$$n = \frac{n_0}{\sqrt{1 + n_0^2[-\nu p_{11} + (1 - \nu)p_{12}]\varepsilon_{xx}}} \quad (3)$$

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

$$D_{opt}(t) = \int_a^b \frac{n_0}{\sqrt{1 + n_0^2[(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}]\varepsilon_{xx}}} \cdot \sqrt{1 + 2\varepsilon_{xx}} dx \quad (4)$$

avec ε_{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, $p_{11} \approx 0.12$ et $p_{12} \approx 0.27$ les constantes photoélastiques de la FO [1]. Les détails sur la détermination de ces expressions sont donnés dans [3].

3.2 Hypothèses simplificatrices

Sous l'hypothèse classique des petites déformations ($\varepsilon_{xx} \ll 1$), des développements limités au premier ordre des expressions (2) et (3) 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 $n_\varepsilon = -\frac{1}{2}n_0^3[(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}]\varepsilon_{xx} = \kappa \varepsilon_{xx}$, κ étant une constante égale à -0.19 .

Il vient alors :

$$\Delta D_{opt}(t) \approx (n_0 + \kappa) \int_a^b \varepsilon_{xx} dx = 1.27 \cdot \Delta D_{AB}(t) \quad (5)$$

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

En petites déformations, la variation de longueur optique est égale à la variation de longueur physique à une constante multiplicative près. Dans la suite, nous nous intéresserons donc seulement au calcul de $\Delta D_{AB}(t)$. Notons que l'écart entre ces deux grandeurs est de l'ordre de 27 %.

3.3 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 :

$$\Delta D_{AB}(t) = -y \int_a^b \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial d^2} x \quad (6)$$

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

$$\Delta D_{AB}(t) \approx -y \sum_{k=1}^N b_k(t) \left(\int_a^b \frac{\partial^2 \phi_k(x)}{\partial x^2} dx \right) \approx -y \sum_{k=1}^N b_k(t) \Phi_k(a, b) \quad (7)$$

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 [13, 16].

4 Etude numérique

La particularité des ELB-CA est qu'ils possèdent une longue base de mesure. Les définitions usuelles des noeuds et ventres de vibrations, définies pour les modes, ne s'appliquent plus pour le placement de ces capteurs. Nous allons donc définir leurs équivalents pour les ELB-CA.

4.1 « Noeuds de vibration » pour un ELB-CA

Un noeud de vibration est un point fixe caractéristique d'un mode d'une structure. Positionner un capteur à un noeud 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 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.

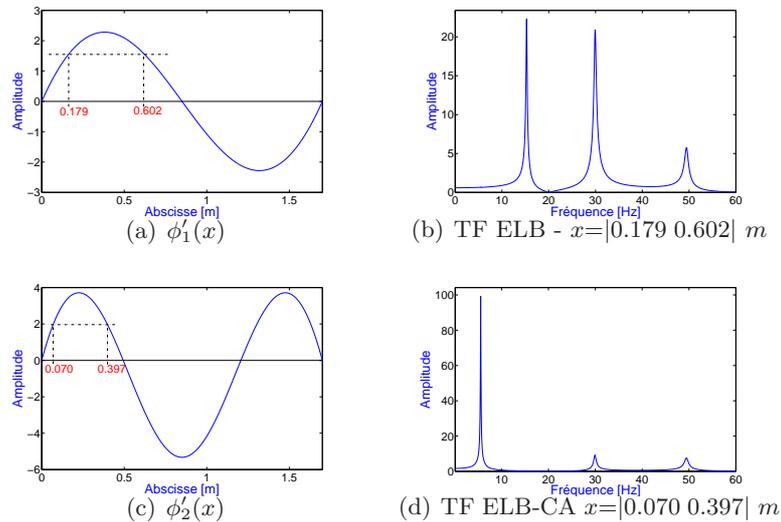


FIGURE 2 – Exemple de configurations d'ELB-CA permettant de filtrer l'un des deux premiers modes d'une poutre bi-encastée : (a) premier, (c) deuxième.

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 2(b), 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 noeuds par modes. L'ELB-CA possède donc des capacités de filtrage modal très riche.

4.2 « 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. 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.

5 Validation expérimentale : analyse modale d'une poutre E-L

La poutre E-L testée est en plexiglas et ses dimensions sont $1 \times 0.07 \times 0.005$ (en m). Elle est instrumentée avec huit accéléromètres, quatre jauges, trois ELB-CA FOGALE et excitée à l'aide d'un marteau de choc. Le lieu d'excitation de la poutre se situe au niveau de l'extrémité libre de la poutre.

Les jauges étant collées continûment à la surface de la poutre, tout comme l'ELB-CA, nous supposons en première approximation qu'elles permettent également de mesurer la longueur physique $D_{AB}(t)$. A l'indice de réfraction près, elles vont donc permettre de valider la mesure des ELB-CA.

Le positionnement des différents capteurs est le suivant : accéléromètres ($x=0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875$ et 1 m), jauges ($[0.02\ 0.14], [0.29\ 0.41], [0.56\ 0.68]$ et $[0.82\ 0.94]$) et ELB-CA ($[0.05\ 0.25], [0.4\ 0.6]$ et $[0.76\ 0.96]$). La figure 3 présente une photo de la poutre avec les différents capteurs.

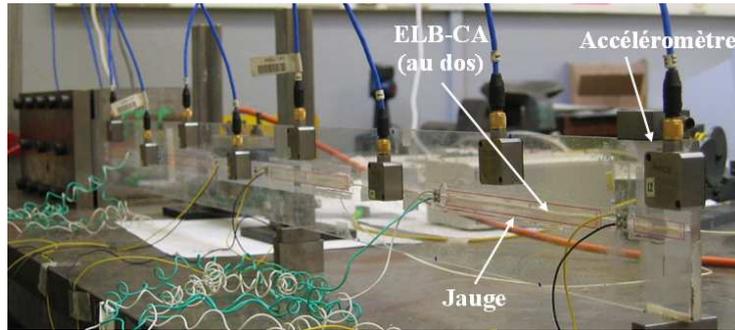


FIGURE 3 – Photo de la poutre E-L instrumentée.

Des essais de faible amplitude ($\approx 3\text{ N}$) ont été réalisés et traités en utilisant la Transformée en Ondelettes Continue (TOC) [10] afin d'obtenir les paramètres modaux des deux premiers modes de la poutre. Les fréquences propres et amortissements modaux des deux premiers modes obtenus avec les accéléromètres, les jauges et les ELB-CA sont quasi-identiques. La figure 4 illustre les formes modales des deux premiers modes observées avec les accéléromètres, les jauges et les ELB-CA. Sur les figures 4(b), 4(c), 4(e) et 4(f), les courbes tracées en traits discontinus représentent respectivement les courbures modales, normées au maximum $\phi_1''(x)$ et $\phi_2''(x)$ pour la poutre E-L.

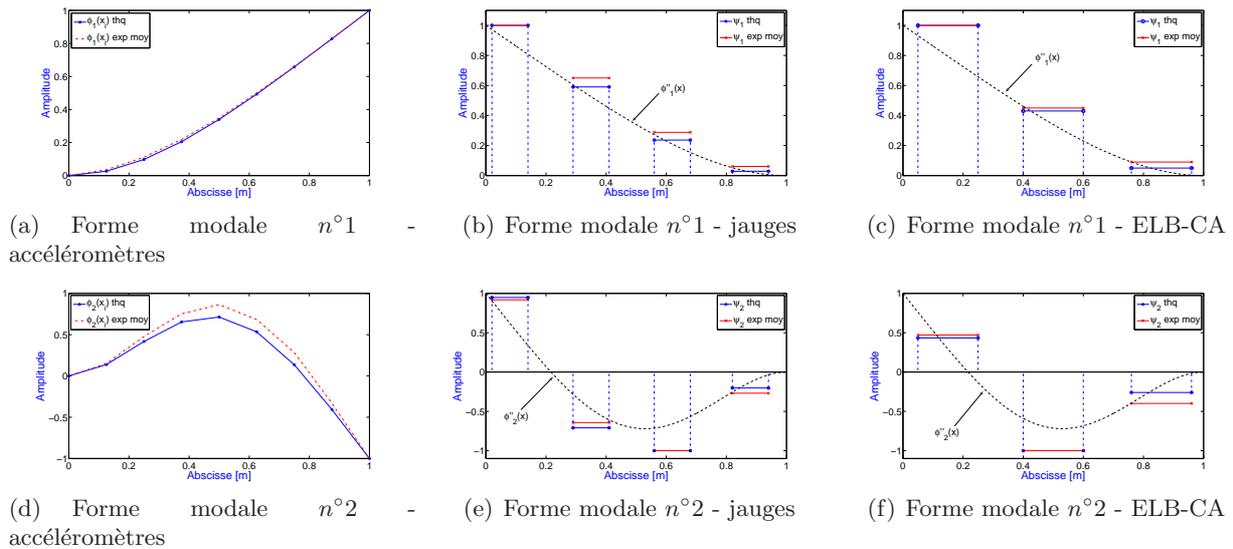


FIGURE 4 – Formes modales obtenues avec la TOC à partir des signaux des accéléromètres, des jauges et des ELB-CA.

Les formes modales expérimentales ont également été normalisées au maximum. Les différences obtenues entre les formes modales expérimentales et théoriques (Fig. 4(a)) sont majoritairement dues au caractère intrusif des accéléromètres (+30 % de masse). Il apparaît clairement, au vu des graphes, que les formes modales obtenues à partir des ELB-CA sont des diagrammes en bâtons liés à la courbure modale de la structure. Une application particulièrement adaptée à la mesure réalisée par l'ELB-CA est donc la détection d'endommagements à partir de méthodes utilisant la courbure modale.

6 Conclusions

Nous avons mis en avant le fait que les formes modales obtenues à partir de la mesure d'ELB-CA ne sont pas les mêmes que celles obtenues à partir de capteurs ponctuels classiques (déplacement, vitesse

et accélération). En effet, ces derniers permettent d'obtenir les déformées modales, $\phi_k(x)$, tandis qu'à partir des ELB-CA l'intégrale de la courbure modale entre les bornes du capteur, $\int_a^b \phi_k''(x) dx$, est obtenue. Ce résultat a été confirmé par une validation expérimentale réalisée avec l'appareil de mesure FOGALE sur une poutre E-L. En ce qui concerne les caractéristiques fréquentielles, la mesure des ELB-CA possède les mêmes caractéristiques qu'une mesure de déplacement, à savoir qu'elle privilégie les basses fréquences contrairement aux accéléromètres, plus sensibles aux hautes ou moyennes fréquences suivant la technologie du capteur (piezoélectrique, capacitif ou inductif). Les notions de filtrage modal (« noeuds » d'observation) et de maximum modal (« ventres » d'observation) pour les ELB-CA ont été définies. Elles sont différentes de ce que l'on obtient classiquement pour des capteurs ponctuels et permettent d'envisager des perspectives intéressantes quant au placement optimal des ELB-CA et au filtrage de modes.

Références

- [1] Ansari F., Libo Y. 1998 Mechanics of Bond and Interface Shear Transfer in optical Fiber Sensors *Journal of Engineering Mechanics* **124**(4) 385-394
- [2] Courteville, A., Delaveau, M., Delepine-Lesoille, S., Merliot, E., Quetel, L. 2006 New concept of low intrusion quasidistributed optical fibre extensometer *In Proceedings of Photonics Europe*
- [3] Cumunel, G., Delepine-Lesoille, S., Argoul, P., Nguyen, T.M. 2007 Les extensomètres longue base souples continûment attachés (ELB-CA), capteurs pour l'analyse vibratoire des structures *Mécanique & Industries* **8** 515-527
- [4] Gérardin, M., Rixen, D. 1996 Théorie des vibrations : Application à la dynamique des structures Masson
- [5] Glisic, B., Inaudi, D. 2003 Sensing tape for easy integration of optical fiber sensors in composite structures *In Proceedings of the 16th International Conference on optical Fiber Sensors (Nara, Japan)*
- [6] Inaudi, D., Vurpillot, S. 1999 Monitoring of Concrete Bridges with Long-Gage Fiber optic Sensors *J. Intell. Mtals. Sys. Struct.* **10** 280-292
- [7] Inaudi, D. 2003 State of the art in fiber optic sensing technology and EU structural health monitoring projects *In Proceedings of the First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure (Tokyo, Japan)*
- [8] Inaudi, D., Glisic, B. 2004 Combining Static and Dynamic deformation monitoring with long-gauge fiber optic sensors *In Proceedings of the International Association for Bridge Maintenance and Safety (Kyoto, Japan)*
- [9] Ko, J.M., Ni, Y.Q. 2005 Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges *Eng. Structures* **27** 1715-1725
- [10] Le, T.P., Argoul, P. 2004 Continuous wavelet transform for modal identification using free decay response *Journal of Sound and Vibration* **277** 73-100
- [11] Meo, M., Zumpano, G. 2005 on the optimal sensor placement techniques for a bridge structure *Eng. Structures* **27** 1488-1497
- [12] Perez J.P. 2004 optique : fondements et applications avec 250 exercices et problèmes résolus Dunod, Paris
- [13] Reynders, E., De Roeck, G. 2005 Measurement of modal curvature using optical fiber strain sensors and application to damage identification using vibration monitoring *In Proceedings of the 17th International Conference on optical Fiber Sensors* pp. 1076-1079
- [14] Yan, T.H., Lin, R.M. 2006 General optimization of sizes or placement for various sensors/actuators in structure testing and control *Smart Mat. and Struct.* **15** 724-736
- [15] Zhao, Y., Ansari, F. 2001 Quasi-distributed fiber-optic strain sensor : principle and experiment *Appl. opt.* **40** 3176-3181
- [16] Zonta, D., Pozzi, M., Forti, M., Zanon, P. 2005 Vibration-based condition monitoring of smart prefabricated concrete elements *Key Engineering Materials* **293-294** 743-750