



Modélisation mécanique et validation expérimentale d'un dispositif de mesure pour ouvrage d'art

Mechanical modeling and experimental validation of a measuring device for an engineering structure

M. Barbachi^{1*}, F. Bourquin²

¹ENSA, Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir - BP 1136 Agadir - Maroc,

²IFSTTAR, Département COSYS Composants et Systèmes - 14, 20 boulevard Newton - Cité Descartes - Champs-sur-Marne 77447 - Marne-la-Vallée Cedex 2 - France

Received 28 June 2016, Revised 19 Oct 2016, Accepted 23 Oct 2016

*Corresponding Author. E-mail: m.barbachi@uiz.ac.ma

Abstract

The maintenance of civil engineering structures requires regular checks. In this context, the fiber optic sensors have certain potentials for more an efficient automatic or semi-automatic maintenance solutions. The application of this study is about the development of an instrumentation dedicated to measuring vertical load through the support of a bridge. In this paper, we have equipped the central metallic plat of bridge bearings by fiber optic sensors. The microbending loss mechanism is used and the principle of the method is based on the measurement of the light attenuation in the sensor output. The development of instrumentation required firstly the theoretical modeling of the behavior of the sensor embedded in the rubber by the finite element method, and secondly, conducting a series of experiments to validate the models developed. The results of these studies are presented.

Keywords : Engineering structures, fiber optic, mechanical modeling, finite elements, Experiments.

Résumé

Pour garantir la pérennité d'une structure de génie civil, des contrôles réguliers sont nécessaires. Ces contrôles exigent des interventions périodiques et/ou permanentes faisant appel à des tests appropriés. Dans le cadre de la surveillance d'un pont, les capteurs à fibres optiques ont des potentialités leurs permettant de proposer des solutions automatique ou semi-automatique intéressantes. L'application visée par cet article concerne le développement d'une instrumentation dédiée à la pesée des charges verticales au niveau des appuis. Pour ce faire, nous avons équipé la frette centrale d'un appareil d'appui en élastomère à l'aide de plusieurs capteurs à fibres optiques conditionnées en micro-courbures au moyen d'un ressort métallique de différents pas mécanique. Le principe de la méthode repose sur la mesure de l'atténuation lumineuse en sortie du capteur. La mise au point de l'instrumentation a nécessité, d'une part, la modélisation théorique du comportement du capteur noyé dans de l'élastomère par la méthode des éléments finis, et d'autre part, la réalisation d'une série d'expérimentations permettant de valider les modèles développés. Les résultats de ces différentes études sont présentés.

Mots clés : Ouvrages d'art, fibres optiques, modélisation mécanique, éléments finis, expérimentation.

1. Introduction

La fonction des appareils d'appui est de transmettre les efforts d'un élément d'une structure à un autre, tout en permettant des déplacements relatifs [1]. Dans le cas des ponts, les appareils, interposés entre le tablier et ces appuis (pile ou culées), assurent essentiellement la transmission des descentes de charge verticales et laissent au tablier une certaine liberté de mouvement en rotation et en translation. Une connaissance permanente des réactions au niveau des appuis pourrait nous informer sur le fonctionnement de l'ouvrage, et permettre ainsi de

détecter d'éventuelles anomalies de façon précoce. De plus, si cette information est exploitée dans le cadre d'une instrumentation multicapteurs, elle permettrait de contribuer efficacement à l'évaluation en temps réel de l'état de santé d'une structure (structures intelligentes). C'est l'objectif de ce travail.

La méthodologie développée consiste à instrumenter ces appareils par des capteurs à fibres optiques. Son principe repose sur la mesure de l'atténuation lumineuse d'une fibre optique multimode conditionnée en microcourbures.

2. Le capteur et son insertion dans un appareil d'appui

2.1 Son principe

Le capteur adopté utilise la modulation d'amplitude ; son principe repose sur la mesure de l'intensité lumineuse transmise en sortie de fibre. Selon le conditionnement utilisé, la variation de cette énergie peut être directement liée aux divers types de sollicitations appliquées à la fibre (température [2], [3], pression [4], déplacement [5], [6] [7], ...). La plupart de ces capteurs utilisent des fibres optiques multimodes, revêtues d'une gaine généralement en polyimide lorsqu'il s'agit de détecter des sollicitations de type pression. Dans ce travail, le capteur est constitué d'une fibre optique multimode entourée d'une hélice métallique (Figure 1); une sollicitation verticale de celui ci induit des microcourbures fonction de la charge appliquée.

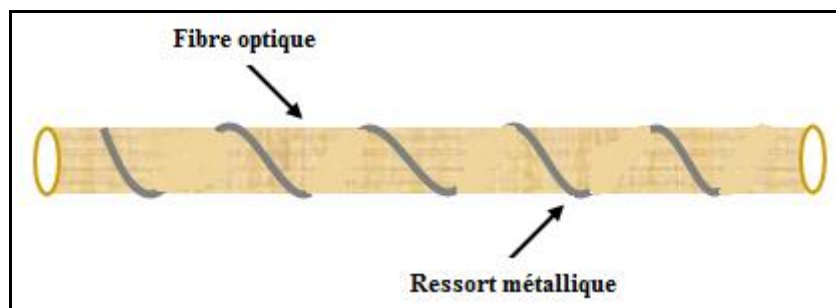


Figure 1 : Fibre optique entourée d'un ressort métallique

2.2 Instrumentation d'un appareil d'appui

Un appareil d'appui est constitué de $n+1$ feuillets de caoutchouc séparés par n tôles d'acier assurant le frettage [1]. Ce dernier n'est pleinement efficace si les feuillets de caoutchouc sont parfaitement adhérisés aux frettes. Le revêtement polyamide de la fibre a été choisi pour tenir compte de ces conditions.

L'instrumentation envisagée consiste à équiper la frette centrale d'un appareil d'appui fretté par le capteur défini précédemment, avant la fabrication de l'appareil d'appui; ainsi après vulcanisation de l'ensemble les fibres se trouvent noyées dans l'appareil (Figure 2).

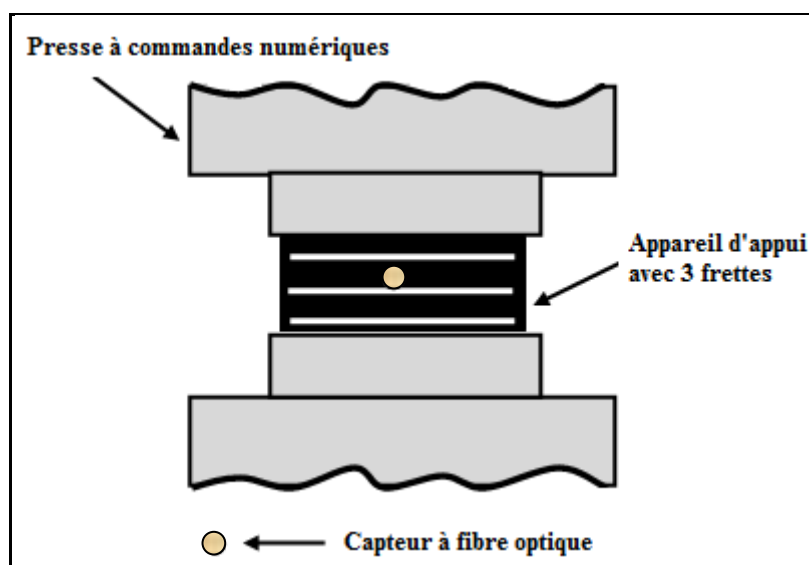


Figure 2 : Capteur noyé dans un appareil d'appui

Afin d'optimiser les performances du capteur, un choix judicieux de différents paramètres (pas de l'hélice et sa longueur, gaine mécanique,...) a été opéré [8-12].

3. Modélisation mécanique

3.1 Modèle du calcul

La modélisation du comportement en microcourbures s'effectue en considérant plusieurs positions de contact du ressort avec la fibre. Pour chaque cas, un calcul bidimensionnel par éléments finis a été effectué sur le code de calcul CESAR-LCPC [13], (Figure 3, Figure 4). Le ressort doit rester indéformable pendant le processus de chargement et que son rôle essentiel est de servir d'appui rigide à la fibre. Celle-ci doit donc pouvoir se déplacer librement et indépendamment de l'hélice métallique. Cet aspect physique peut être résolu mécaniquement en considérant les déplacements du centre de chaque position de l'hélice (horizontal et vertical) comme nuls, et en modélisant la surface de contact entre la fibre et l'hélice par des éléments particuliers dits 'éléments de contact'. Ces éléments assurent la discontinuité des déplacements (glissement et décollement) entre la fibre et le ressort [14]. Le maillage pris en compte pour le calcul par éléments finis est présenté en figure 5. Il comporte des éléments triangulaires massifs à 6 nœuds (T6) et des éléments quadrilatères massifs à 8 nœuds (Q8). Les éléments de contacts à 6 nœuds (Q6) sont déclarés initialement actifs (en contact) avec une résistance mécanique nulle.

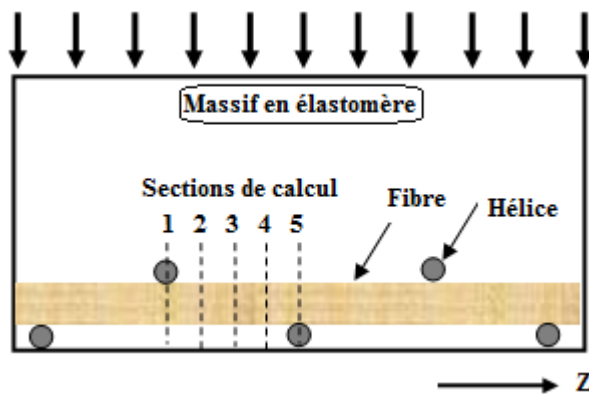


Figure 3 : Vue longitudinale du modèle

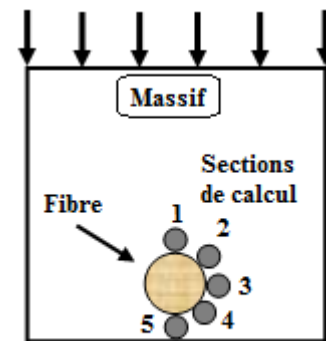


Figure 4 : Vue transversale du modèle

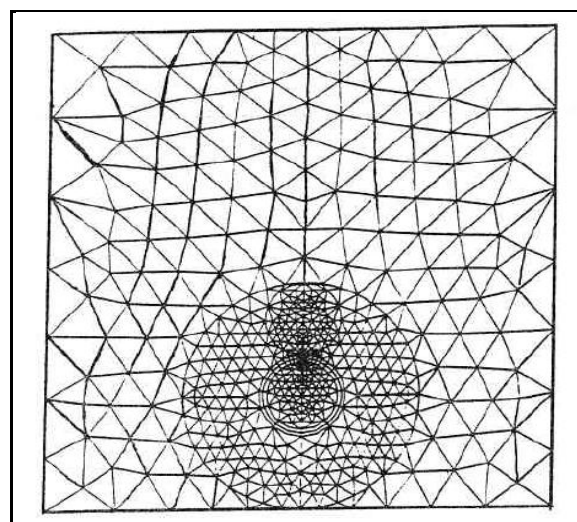


Figure 5 : Maillage du calcul

3.2 Résultats de calculs

La figure 6 présente les résultats relatifs à la géométrie longitudinale de la fibre pour un module d'Young du caoutchouc de 3MPa et pour un chargement uniforme de 20MPa appliqué au massif. L'association de ces

résultats à ceux issus d'un modèle de référence, conçu et réalisé au laboratoire LCPC [15] afin d'étudier le couplage élastoplastique du problème montre que pour une flèche théorique de $7.6 \mu\text{m}$, l'atténuation du signal lumineux est négligeable et elle est de l'ordre de 1.8dB/MPa .

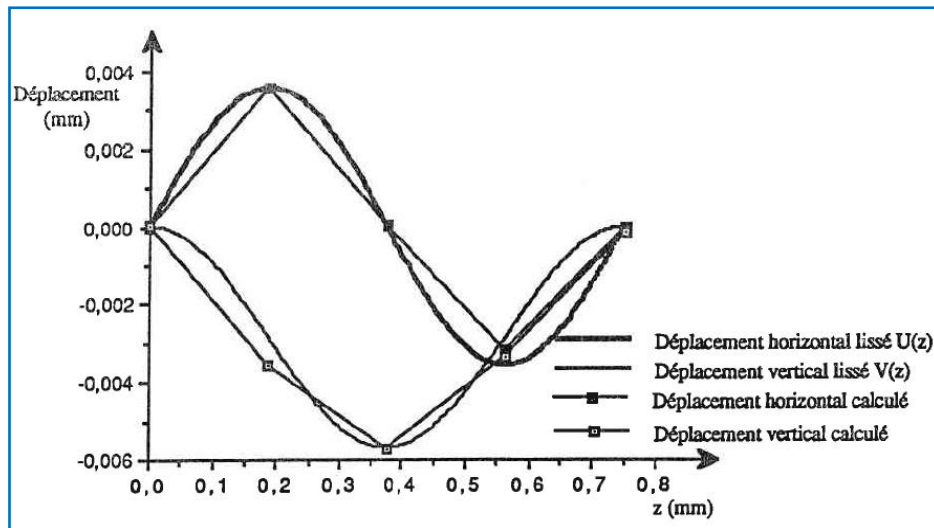


Figure 6 : Déformée longitudinale de la fibre pour différentes positions de contact de l'hélice suivant z et pour $E=3\text{MPa}$

4. Validation expérimentale

4.1 Instrumentation interne d'un appareil d'appui

Dans le cadre de l'instrumentation des appareils d'appui par les capteurs à fibres optiques, la première possibilité directe qui s'offre à nous est d'équiper dans un premier temps la frette centrale à l'aide du capteur à microcourbures défini précédemment et qui se compose d'une fibre multimodes 100/140/170.

Pour permettre l'interrogation des capteurs, les fibres sont munies de connecteurs à chaque extrémité. Cette disposition permet, ensuite, de les relier au système optoélectronique. La technologie adoptée offre la possibilité de relier l'atténuation lumineuse (paramètre mesuré en sortie de fibre) à la sollicitation mécanique extérieure appliquée à l'appareil d'appui. Les essais ont consisté à solliciter le modèle en compression simple avec une charge variant de 0MPa à 15MPa . A titre d'exemple, nous présentons ici les résultats d'un essai réalisé en laboratoire, figure 7.

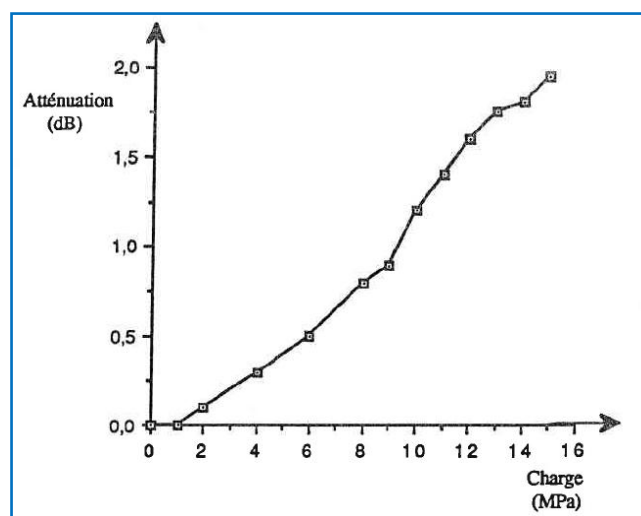


Figure 7 : Atténuation de la fibre optique en fonction de la charge de compression

Au vu de ces résultats, on constate que le capteur présente une étendue de $2\text{dB}/15\text{MPa}$ dans la zone de fonctionnement usuelle d'un appareil d'appui. Ce résultat confirme la modélisation numérique développée

précédemment c.-à-d. des problèmes de sensibilité et de reproductibilité liés à l'insertion. En effet, la faible sensibilité des capteurs peut être attribuée à l'incompressibilité du matériau caoutchouc (coefficient de poisson $\nu=0.5$) qui induit au voisinage du capteur un état de contraintes quasi-sphérique défavorable à la création de phénomènes de microcourbures d'amplitude importante.

Pour pallier ces insuffisances, le système sensible a été dissocié de l'appareil d'appui. Cette adaptation est susceptible de rendre le capteur sensible à une sollicitation verticale.

4.2 Instrumentation externe d'un appareil d'appui

4.2.1 Description de la frette

Il s'agit dans cette phase d'instrumenter une frette de trois capteurs à fibres optiques qui sera placée sous appareil d'appui. La description de cette frette et du dispositif expérimental de l'essai de compression sous presse sont présentés respectivement sur la figure 8 et la figure 9.

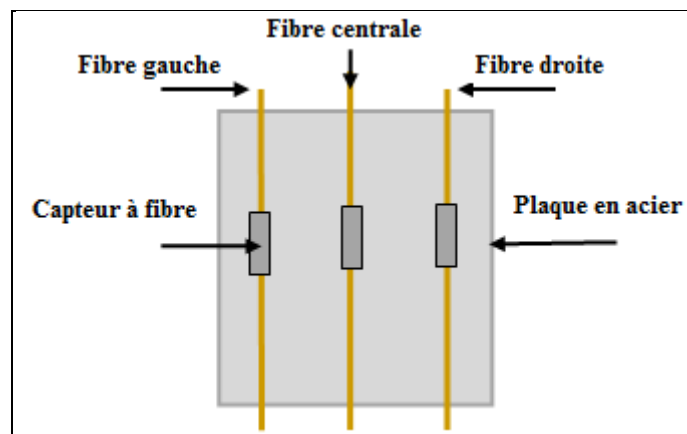


Figure 8 : Disposition des trois capteurs sur la frette indépendante

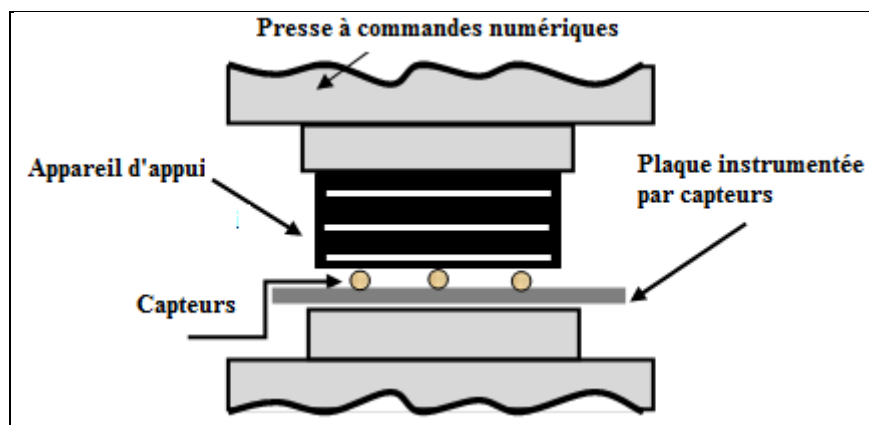


Figure 9 : Dispositif expérimental d'un essai de compression sur un appareil d'appui fretté

Plusieurs essais ont été nécessaires pour tester la fiabilité et la reproductibilité des réponses, figure 10. Pour tous ces capteurs, nous sommes montés progressivement en compression jusqu'à une valeur de 750KN, ce qui correspond, par rapport à la section de l'appareil d'appui, à une pression de l'ordre de 15MPa.

Dans ces conditions, on constate que l'évolution de l'atténuation lumineuse en fonction de la charge présente deux zones de fonctionnement : une zone linéaire plus sensible et une zone non linéaire de plus faible sensibilité. Ce type de fonctionnement peut être attribué à plusieurs phénomènes, en particulier au comportement non linéaire du caoutchouc.

Afin d'avoir une étendue de mesure du capteur conforme aux conditions d'utilisation d'un appareil d'appui sur site (charge comprise entre 10 et 20MPa), un moyen simple a du être trouvé pour décaler l'origine de fonctionnement du capteur : il s'agit de pratiquer une entaille de la forme de V à l'emplacement des capteurs sur la frette.

4.2.2 Modification de la frette

Les dimensions et la forme en V de l'entaille sont le résultat d'une modélisation développée en parallèle (Figure 11).

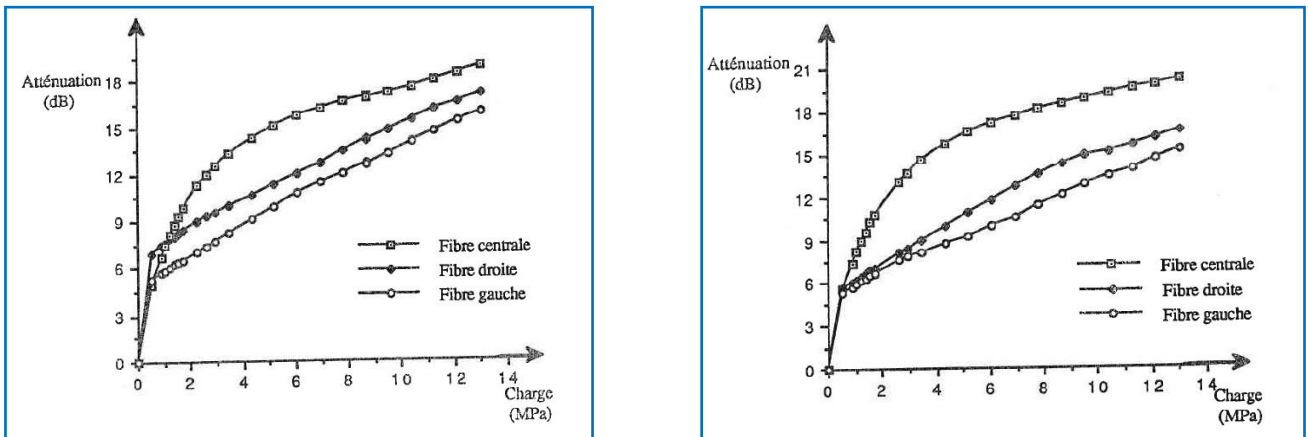


Figure 10 : Deux essais de compression simple de l'atténuation en fonction de la charge appliquée

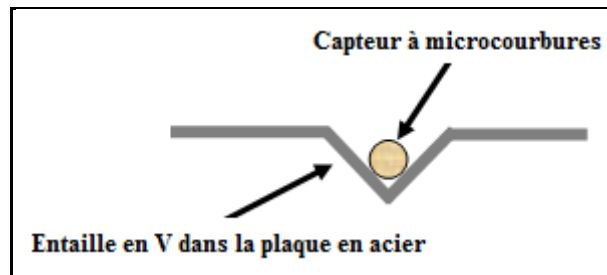


Figure 11 : Description de l'entaille

Nous avons ensuite décidé de lancer une nouvelle série d'essais en prenant en compte l'entaille en forme de V. Nous avons testé successivement, et dans les mêmes conditions d'expériences, plusieurs capteurs identiques afin d'examiner la fiabilité et la reproductibilité des réponses à la fois de chaque capteur seul mais aussi des capteurs entre eux. La figure 12 présente les résultats de ces différents essais.

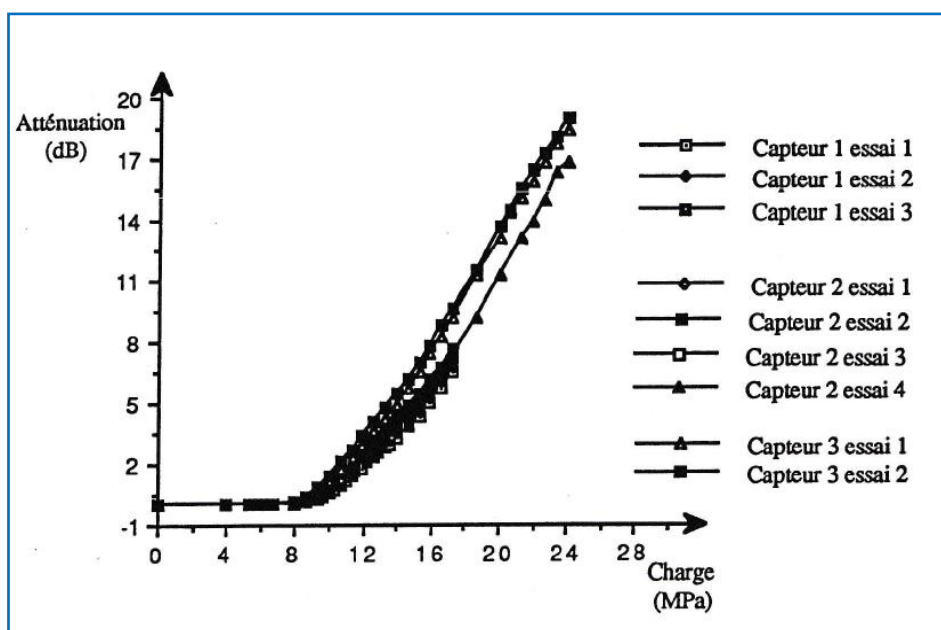


Figure 12 : Comparaison des réponses des différents capteurs en charge de compression

On constate, malgré tout de légères différences de réponses des capteurs. Ceci qui peut être pénalisant pour un fonctionnement en absolu, ne présente aucun gêne pour un fonctionnement en relatif. C'est précisément le cas. De ce fait, un étalonnage préalable de chaque capteur est nécessaire.

Conclusion et perspectives

Le choix définitif de l'instrumentation des appareils d'appui par fibres optiques s'est porté sur l'équipement indépendant d'une frette en acier avec possibilité d'intervenir sur la réponse du capteur en modifiant la géométrie de l'entaille en forme de V considérée.

Cette étude de faisabilité, qui a abouti à la réalisation d'un prototype, augure le développement d'une nouvelle génération d'appareils d'appui permettant de connaître en temps réel les descentes de charge au niveau d'un pont. Cette information, exploitée dans le cadre d'une instrumentation multicapteurs, permettrait de contribuer efficacement à l'évaluation en temps réel de l'état de santé de la structure.

Références

1. Appareils d'appui en élastomère fretté, *Guide technique SETRA* (2007)
2. Rinaudo Paula, Paya-Zaforteza Ignacio, Calderón Pedro, Sales Salvador, *Sensors and Actuators A : Physical* 243 (2016) 167
3. Yixian Ge, Qingquan Liu, Jianhua Chang, Jiahong Zhang, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 124 (2013) 6946
4. Berghmans F., Geernaert T., Sonnenfeld C., Sulejmani S., Thienpont H., *Optofluidics, Sensors and Actuators in Microstructured Optical Fibers* (2015) 139
5. Ganesan Krishnan, Noriah Bidin, Mundzir Abdullah, Muhammad Fakaruddin Sidi Ahmad, Mohammad Aizat Abu Bakar, Moh Yasin, *Sensors and Actuators A: Physical* 247 (2016) 227
6. Feilong Lin, Stuart T. Smith, Ghazanfar Hussain, *Precision Engineering* 36 (2012) 620
7. Peters K.J, Inaudi, D., *Sensor Technologies for Civil Infrastructures* (2014) 121
8. Jonathon D.Weiss, Fiber optic strain gauge. *IEEE* (1989)
9. Lagakos N, Cole JH, Bucaro JA, *Applied Optics* 26 (1987) 2171
10. Jeunhomme L., Pocholle J.P., *Applied optics* 14 (1975) 2400
11. Marcuse D., *The Bell System Technical Journal* 55 (1976) 937
12. Gloge D., *The Bell System Technical Journal* 51 (1972) 1767
13. Manuel d'utilisation de CESAR-LCPC, Ed. Ifsttar (2015)
14. Bussetta P., *Thèse de doctorat de l'université du Québec à Chicoutimi* (2009)
15. Rapport interne LCPC, *Division Mesure et instrumentation* (2010)

(2016) ; <http://www.jmaterenvironsci.com>