# MESURES SIMULTANÉES DES DÉFORMATIONS AXIALES ET RADIALES AU SEIN DES MATÉRIAUX

**Romain Guyard**[1], **Dominique Leduc**[1], **Yann Lecieux**[1] **et Cyril Lupi** [1]

[1] *Institut de Génie Civil et de Mécanique (GeM) , l'UNAM Université, Université de Nantes, UMR CNRS 6183, 2 rue de la houssinière, 44322 NANTES, France*

Romain.Guyard@univ-nantes.fr

**RÉSUMÉ**

Dans cet article nous proposons une architecture de capteur à fibre optique associant un réseau de Bragg (FBG) et un réseau longue période (LPG), capable de mesurer simultanément les déformations axiales et radiales au cœur d'un matériau et évaluons ses performances.

**MOTS-CLEFS :** *Capteurs de déformation; Réseaux de Bragg ; Réseaux longue période.*

## 1. INTRODUCTION : CONTEXTE ET OBJECTIFS

Les réseaux de Bragg fibrés ont aujourd'hui largement fait leurs preuves en tant que capteurs de déformation lorsqu'ils sont collés en surface. Leur utilisation est plus délicate lorsqu'ils sont enfouis. En effet, dans ce cas ils ne sont pas libres de se déformer radialement du fait du couplage mécanique avec le matériau hôte. Du coup, le problème comporte plusieurs déformations inconnues. Lorsque la déformation radiale est isotrope, configuration dans laquelle nous nous placerons pour tout le reste de l'article, il y a deux inconnues : la déformation radiale et la déformation axiale. Cela implique que la mesure du décalage de la longueur d'onde de Bragg d'un seul réseau n'est pas suffisante, une seconde mesure est nécessaire.

Récemment, il a été proposé d'associer un FBG et un LPG pour accomplir cette tâche[1]. Dans ce papier, nous validons cette proposition et présentons un dimensionnement du capteur permettant de remplir le cahier des charges suivants : a) mesurer simultanément et au même endroit la déformation radiale et la déformation axiale ; b) présenter des performances vis à vis de la déformation axiale comparables à celles d'un FBG collé en surface ; c) ne présenter que deux modes de résonance dans la bande de longueur d'onde [1400 nm ; 1600 nm], un pour le FBG et un pour le LPG avec un coefficient de couplage $>$ 0,8 $\mu$m$^{-1}$ ; d) ne pas être trop sensible aux courbures et d) avoir un comportement linéaire dans la gamme de déformation $\pm$5000 $\mu\varepsilon$.

## 2. ARCHITECTURE DU CAPTEUR

La géométrie du capteur est illustrée en figure 1. C'est une fibre optique double gaines à saut d'indice. Elle comporte un cœur de rayon $a_1$ et d'indice $n_1$, une première gaine de rayon $a_2$ et d'indice $n_2$ et une gaine externe de rayon $a_3$ et indice $n_3$. Toutes ces quantités sont des paramètres du modèle. Afin de garder une structure proche des fibres classiques, on choisit de fixer $a_1$ et $n_1$ aux mêmes valeurs que celles d'une fibre de type SMF28, soit $a_1 = 4,2$ $\mu$m et $n_1 = 1,449588$ à 1550 nm de longueur d'onde, la variation de l'indice avec la longueur d'onde suivant une loi de Sellmeier [2]. Le saut d'indice entre le cœur et la gaine interne est lui aussi fixé à sa valeur classique : $n_1 = 1,0036\ n_2$ pour toute longueur d'onde. Pour calculer les modes de gaine, on utilise l'approximation habituelle qui consiste à assimiler la gaine externe à un milieu semi-infini. Cette approximation tient tant que les modes de gaine décroissent rapidement dans la gaine interne de façon à ne pas voir la frontière entre la gaine externe et le milieu extérieur. En pratique, nos simulations ont montré qu'il suffisait que $a_3 = a_2 + 15\,\mu$m pour que cette condition soit remplie. Finalement, les seuls paramètres opto-géométriques libres sont $a_2$ et $n_3$.

Dans le cœur de la fibre sont superposés un FBG et un LPG. Il est tout à fait possible de photoinscrire ce genre de structure, comme l'a démontré S. Triollet [3]. Le FBG réfléchit le mode de coeur

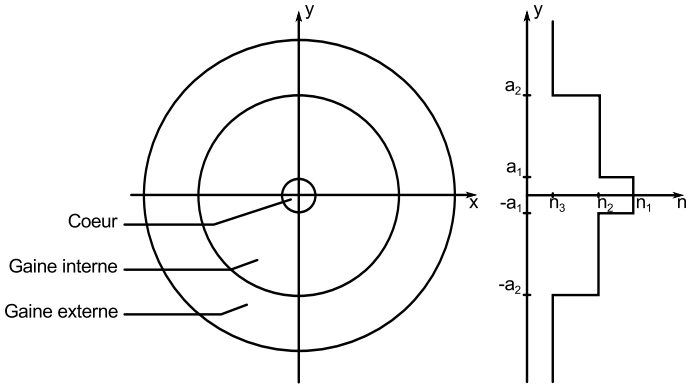



FIGURE 1: Géométrie de la fibre optique et son profil d'indice associé.

incident à la longueur d'onde de Bragg $\lambda_B$ faisant apparaître, en transmission, un creux centré en $\lambda_B$ :

$$\lambda_B = 2n^c_{\text{eff}}(a_i, n_i, \lambda_B)\,\Lambda_B \tag{1}$$

où $n^c_{\text{eff}}$ est l'indice effectif du mode de cœur et $\Lambda_B$ le pas du réseau de Bragg. Le LPG, quant à lui, couple le mode de cœur à plusieurs modes de gaine. Il y a apparition dans le spectre transmis, d'une multitude de résonances centrées aux différentes longueurs d'onde $\lambda^m_{LPG}$ :

$$\lambda^m_{LPG} = \left[n^c_{\text{eff}}(a_i, n_i, \lambda_{LPG}) - n^m_{\text{eff}}(a_i, n_i, \lambda_{LPG})\right]\Lambda_{LPG} \tag{2}$$

où $n^m_{\text{eff}}$ est l'indice effectif du m$^{ieme}$ mode de gaine couplé, solution de l'équation caractéristique des modes de gaine et $\Lambda_{LPG}$ est le pas du LPG. On fixe la longueur d'onde de Bragg du FBG à 1579 nm, ce qui fixe son pas à 546 nm. Le pas du LPG est quant à lui un paramètre libre du modèle.

## 3. DIMENSIONNEMENT DU CAPTEUR

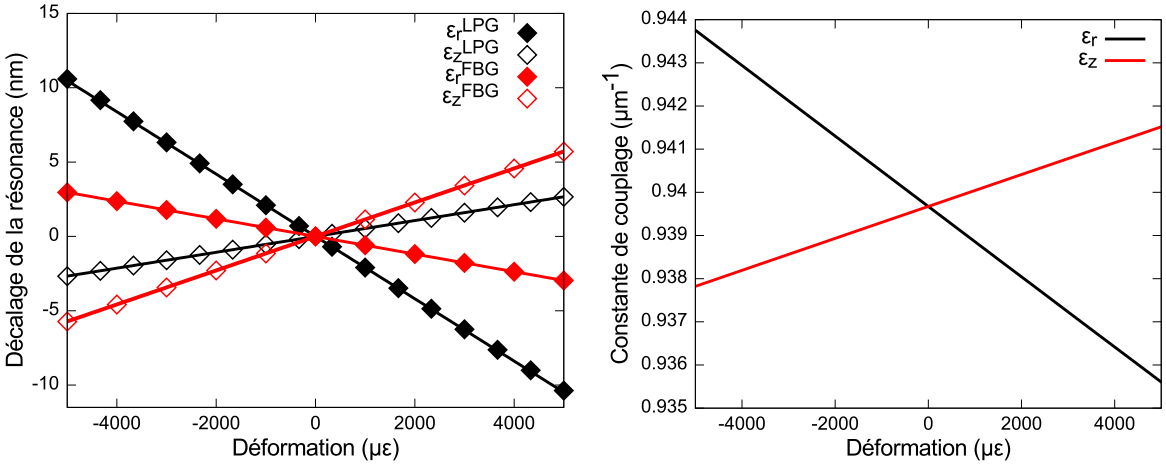
Pour déterminer une architecture satisfaisant le cahier des charges on commence par se donner un ensemble de paramètres $\{a_2, n_3, \Lambda_{LPG}\}$ et on résout les équations des modes guidés pour le mode de cœur et les modes de gaine [4], ce qui donne $n^c_{\text{eff}}$ et $n^m_{\text{eff}}$. S'il existe plusieurs modes de gaine dont les longueurs d'onde de résonance, données par l'équation (2), sont dans l'intervalle [1400 nm ;1600 nm], on modifie les paramètres d'entrée. Sinon, on applique une déformation radiale $\varepsilon_r$ et une déformation axiale $\varepsilon_z$ à la fibre ce qui induit une variation des rayons : $a_i = a_{i0}(1+\varepsilon_r)$, des pas : $\Lambda = \Lambda_0(1+\varepsilon_z)$, et des indices par effet photo-élastique :

$$n_i(\lambda) = n_{i0}(\lambda) - \frac{n^3_{i0}(\lambda)}{2}\left[p_{12}\varepsilon_z + (p_{11}+p_{12})\varepsilon_r\right] \tag{3}$$

où les quantités affectées d'un indice 0 correspondent aux valeurs des paramètres lorsque le capteur est au repos. On résout alors à nouveau les équations des modes guidés pour trouver les nouveaux indices et les nouvelles longueurs d'onde résonantes pour le FBG et le LPG. On réitère cette opération pour différentes déformations et on sélectionne les configurations où les réseaux se comportent très différemment pour assurer une bonne discrimination des deux déformations inconnues.

Finalement, la configuration retenue est la suivante : $a_2 = 32,9\,\mu$m, $n_3 = 0,95n_2$ et $\Lambda_{LPG} = 330,9\,\mu$m. La résonance du LPG est centrée en $\lambda_{LPG} = 1,451\,\mu$m, elle correspond au couplage du 5$^{ieme}$ mode de gaine. La figure 2a présente les variations des longueurs d'onde résonantes pour le FBG et le LPG dans cette structure. Comme on peut le voir, les deux réseaux se comportent de façon vraiment différentes. La sensibilité du FBG à la déformation radiale est $-0,603\,pm/\mu\varepsilon$ tandis que celle du LPG est de $a_{2r} = -2,096\,pm/\mu\varepsilon$. La sensibilité du FBG à la déformation axiale est $1,163\,pm/\mu\varepsilon$ et celle du LPG de $0,534\,pm/\mu\varepsilon$ À partir de ces valeurs, et en considérant que la précision de la mesure en longueur

d'onde est de 1 pm, alors on peut conclure [1] que la plus petite déformation mesurable est de l'ordre de 1 $\mu\varepsilon$, de même que l'incertitude sur $\varepsilon_r$ et $\varepsilon_z$. On retrouve là les performances typiques d'un réseau de Bragg utilisé de façon classique. On peut donc dire que la structure proposée est satisfaisante en terme de performances. Elle l'est aussi en terme de linéarité de la réponse du capteur et en force de couplage du mode de gaine résonant avec le LPG comme en atteste la figure 2b.




(a) (b)

FIGURE 2: Décalages des résonances des réseaux FBG et LPG (a) et du coefficient de couplage du mode de gaine résonant (b) en fonction des déformations radiale $\varepsilon_r$ et axiale $\varepsilon_z$.

Il se pose maintenant le problème de la courbure. En effet, contrairement au FBG, le LPG est très sensible à ce phénomène, notamment à cause de la déformation des modes de gaine se propageant dans la courbure qui entraîne une atténuation des résonances du réseau ainsi que l'apparition de nouvelles résonances dans le spectre transmis. Pour étudier la configuration retenue vis à vis de la courbure, nous avons effectué des simulations par éléments finis à l'aide du logiciel Comsol, et calculé la dégradation des modes en fonction de la courbure. Il apparaît que le mode de gaine est stable tant que la courbure est supérieure à 10 cm.

## 4. CONCLUSION

Tout au long de cet article nous avons démontré la faisabilité d'un capteur à fibre optique permettant de mesurer simultanément les déformations axiale et radiales au cœur d'un matériau. Nous avons montré qu'un dimensionnement approprié de la géométrie du capteur et des caractéristiques des réseaux le constituant permettait d'obtenir une précision comparable aux capteurs en surface. Il reste maintenant à optimiser la structure pour la rendre plus robuste vis à vis des effets des micro-courbures dues, par exemple, à des hétérogénéités dans le matériau instrumenté.

## 5. RÉFÉRENCES


[1] D. Leduc, Y. Lecieux, P.-A. Morvan, and C. Lupi. Architecture of optical fiber sensor for the simultaneous measurement of axial and radial strains. *Smart Material Structures*, 22(7) :075002, July 2013.

[2] V. Bhatia. *Properties and sensing applications of long-period gratings*. PhD thesis, Virginia Tech. Blackburg, 1996.

[3] S. Triollet, L. Robert, E. Marin, and Y. Ouerdane. Discriminated measures of strain and temperature in metallic specimen with embedded superimposed long and short fibre bragg gratings. *Measurement Science and Technology*, 22 :015202, 2011.

[4] T. Erdogan. Cladding-mode resonances in short-and long-period fiber grating filters. *Journal of the Optical Society of America A*, 14(8) :1760–1773, 1997.