



Mesure de gradients de déformations par fibre optique = Strain gradient measurement with optical fiber

Pierre-Antoine Morvan, Xavier Chapeleau, N. Daher, Cyril Lupi, Pascal Casari, D. Leduc, C. Boisrobert

► To cite this version:

Pierre-Antoine Morvan, Xavier Chapeleau, N. Daher, Cyril Lupi, Pascal Casari, et al.. Mesure de gradients de déformations par fibre optique = Strain gradient measurement with optical fiber. Philippe OLIVIER et Jacques LAMON. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. AMAC, 7 p., 2009. <hal-00398014>

HAL Id: hal-00398014

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00398014>

Submitted on 24 Jun 2009

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.

Mesure de gradients de déformations par fibre optique

Strain gradient measurement with optical fiber

P.A. Morvan^{1,2}, X. Chapeleau², N. Daher^{1,2}, C. Lupi², P. Casari¹, D. Leduc², et C. Boisrobert²

1 : Université de Nantes, GeM UMR CNRS 6183
IUT de Saint-Nazaire, 58 rue Michel Ange BP 420 - 44606 St-Nazaire CedexEX
e-mail : Pierre-Antoine.Morvan@univ-nantes.fr, Pascal.Casari@univ-nantes.fr

2 : Université de Nantes, IREENA EA 1770
Faculté des Sciences et Techniques, 2 rue de la Houssinière BP 92208 - 44322 NantesCedex
e-mail : cyril.lupi@univ-nantes.fr

Résumé

Cet article porte sur l'utilisation de fibre optique à réseau de Bragg pour mesurer des profils de déformations non uniformes. Les réseaux de Bragg permettent facilement de mesurer des déformations uniformes, notre méthode est donc expliquée pour mesurer des gradients de déformations. Cette méthode est ensuite testée sur une éprouvette en résine, et les résultats comparés à une simulation numériques. Des fibres optiques à réseau de Bragg sont ensuite insérés dans des éprouvettes en composites stratifiés afin de caractériser les variations de déformations à travers les plis soumis à des sollicitations de flexion.

Abstract

In this article, the focus is put on a strain gradient measurement technique by means of Fibre bragg Gratings (FBG). A first experiment is conducted on a pure resin specimen loaded in tension in order to control the strain gradient and then validate the use of the sensor. A second one consists in embedding a FBG across the width of a laminate in order to measure what is generally not assessed like the shear strain gradient due to transverse loads in bending.

Mots Clés : Bragg, gradient, extensométrie.

Keywords : Bragg, gradient, strain measurement.

1. Introduction

Depuis les années quatre-vingt dix, de nombreuses recherches ont permis de développer et de mettre au point de nouveaux systèmes de capteurs optiques à base de réseaux de Bragg. Ces composants sont d'excellents transducteurs: ils sont très sensibles aux variations de température, de pression et de déformation. De plus, leur petite taille leur confère une faible intrusivité (au sein du matériau) et permet d'effectuer des mesures déportées et distribuées le long d'une fibre optique. Ils peuvent également être utilisés en environnement sévère grâce à leur insensibilité aux perturbations électromagnétiques et leur bonne résistance aux rayonnements ionisants, à la corrosion et à la fatigue. Grâce à ces nombreux avantages, les systèmes de capteurs à base de réseaux de Bragg trouvent aujourd'hui de nombreuses applications de mesure, de détection, de surveillance dans les domaines du génie civil, de l'aéronautique, de la construction marine, de l'industrie pétrolière...

Un réseau de Bragg fibré est obtenu en irradiant avec un laser UV une fibre optique préalablement hydrogénée pour augmenter sa photo-sensibilité [1]. Des franges d'interférences produites par un dispositif interférentiel sont projetées dans le cœur de la fibre pour y inscrire une modulation longitudinale d'indice qui suit la modulation d'intensité lumineuse :

$$n(z) = n_{\text{eff}} + \Delta n_{\text{dc}}(z) + \Delta n_{\text{ac}}(z) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda_0} z + \frac{2\pi}{\Lambda_0^2} \int_0^z (\Lambda(z') - \Lambda_0) dz' \right] \quad (\text{eq. 1})$$

où n_{eff} est l'indice effectif du mode qui se propage, Δn_{ac} l'amplitude de modulation, Δn_{dc} l'indice effectif moyen et $\Lambda(z)$ le pas de modulation. En conséquence, les réseaux de Bragg réfléchissent une fraction de

l'intensité lumineuse incidente, centrée sur la longueur d'onde de Bragg qui dépend de l'indice du mode se propageant dans la fibre et du pas Λ de la modulation d'indice inscrite :

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (\text{eq. 2})$$

Les paramètres n_{eff} et Λ dépendent linéairement de la température et de la déformation appliquées le long du réseau. Pour mesurer une variation uniforme de la température ΔT et de la déformation longitudinale ϵ à l'aide d'un réseau de Bragg, il suffit donc de déterminer le décalage de la longueur d'onde de Bragg :

$$\frac{\Delta\lambda_B(\Delta T, \epsilon)}{\lambda_B} = K_{\Delta T}\Delta T + K_{\epsilon}\epsilon \quad (\text{eq. 3})$$

$K_{\Delta T}$ et K_{ϵ} sont des constantes qui dépendent du coefficient d'expansion thermique, du coefficient thermo-optique, des constantes opto-élastiques de Pockels et du coefficient de Poisson de la fibre optique. Bien que l'ensemble de ces coefficients soient bien connus, ils peuvent varier légèrement d'une fibre à l'autre selon notamment sa nature et son procédé de fabrication. Il est donc recommandé d'effectuer un étalonnage des capteurs à base de réseaux de Bragg afin de déterminer précisément les coefficients $K_{\Delta T}$ et K_{ϵ} . En outre, la relation eq. 1 fait apparaître que les variations de température et de déformation ne peuvent pas être différenciées sans l'aide d'hypothèses. Dans la pratique, ΔT est en effet obtenue en s'assurant que ϵ est nulle et réciproquement. De plus, l'utilisation des capteurs à base de réseaux de Bragg repose sur l'emploi d'une instrumentation de mesure capable de réaliser une analyse spectrale très fine. En effet, pour obtenir une résolution de $1 \mu\epsilon$, il est nécessaire de mesurer un décalage de la longueur d'onde de Bragg d'environ un picomètre. Différentes techniques [2,3] ont été mises au point pour atteindre une telle résolution spectrale. Malgré tout, ce type d'instrumentation ne peut être utilisé que si la variation de température ou de déformation longitudinale est uniforme le long du réseau de Bragg car dans le cas contraire, la bande spectrale réfléchie par le réseau s'élargit, se déforme et le spectre devient inexploitable. Pour mesurer des déformations non uniformes, il est nécessaire de procéder à une caractérisation locale du réseau. L'objet de ce papier est de montrer comment une telle caractérisation peut être exploitée en associant des mesures par interférométrie en lumière faiblement cohérente (LCI) et une méthode inverse (algorithme du layer-peeling) pour mesurer des gradients de déformation dans les matériaux composites.

2. Caractérisation locale des réseaux de Bragg

Effectuer une caractérisation locale d'un réseau de Bragg revient à déterminer son indice effectif moyen $\Delta n_{\text{dc}}(z)$, son amplitude de modulation $\Delta n_{\text{ac}}(z)$ et la variation de son pas de modulation $\Lambda(z) - \Lambda_0$. Les algorithmes de reconstruction mis au point pour effectuer cette tâche sont généralement basés sur la théorie des modes couplés [4,5]. La fibre est supposée mono-mode et sans pertes, autorisant ainsi la propagation dans des sens opposés de deux ondes u_f et u_b . L'action du réseau sur ces ondes est donnée par :

$$\begin{pmatrix} i\partial_z & \Omega(z) \\ \Omega^*(z) & -i\partial_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_f(z) \\ u_b(z) \end{pmatrix} = -k \begin{pmatrix} u_f(z) \\ u_b(z) \end{pmatrix} \quad (\text{eq. 4})$$

où $\Omega(z)$ est le coefficient de couplage du réseau :

$$\Omega(z) = \frac{K}{2} \Delta n_{\text{ac}}(z) e^{i\Psi(z)} \quad (\text{eq. 5})$$

avec

$$\Psi(z) = -\frac{2\eta\pi}{n_{\text{eff}}\Lambda_0} \int_0^z \Delta n_{\text{dc}}(z') dz' - \frac{2\pi}{\Lambda_0^2} \int_0^z (\Lambda(z') - \Lambda_0) dz' \quad (\text{eq. 6})$$

η étant le facteur de confinement du mode.

En pratique, c'est ce coefficient de couplage que calculent les algorithmes de reconstruction. La donnée d'entrée nécessaire à la reconstruction est le coefficient de réflexion *complexe* du réseau. Ce paramètre peut être obtenu par interférométrie en lumière faiblement cohérente. Notre dispositif expérimental est constitué d'un interféromètre de Michelson fibré où un coupleur « 2x2 » tient lieu de lame séparatrice. Une extrémité du coupleur est connectée à l'échantillon sous test, l'autre au bras de référence qui contient un réflecteur mobile. A ce premier interféromètre est couplé un second interféromètre de Michelson en espace libre servant d'horloge d'acquisition. Le coefficient de réflexion complexe de l'échantillon est obtenu grâce à la transformée de Fourier de l'intensité détectée (interférogramme) lorsque la densité spectrale de la source est connue [6,7].

La méthode de reconstruction du profil d'indice est l'algorithme du « layer peeling » [8,9]. Dans cet algorithme, le réseau est découpé en tranches suffisamment fines pour que l'indice de réfraction puisse être considéré uniforme sur chaque tranche. Cet algorithme s'appuie en outre sur le fait que la réponse impulsionnelle du réseau est la transformée de Fourier de son coefficient de réflexion complexe, elle donc aisément calculable dès lors que ce dernier est connu. Il est ensuite fait usage d'un argument de causalité stipulant que, à un instant t , la lumière n'a pas le temps de se propager au delà d'une certaine limite $l(t)$ dans le réseau. Cela implique que seules les tranches comprises entre le début du réseau et $l(t)$ participent à la réponse impulsionnelle $h(t)$. A l'instant initial, seule la première tranche contribue à la réponse impulsionnelle. $h(0)$ étant connue, la détermination de l'indice de la première tranche est immédiat. Il devient alors possible de propager les champs à travers la première tranche, ce qui permet de calculer le coefficient de réflexion complexe du réseau amputé de sa première tranche. Cette opération effectuée, on se retrouve dans la même situation qu'initialement. Il suffit donc de répéter la procédure jusqu'à la fin du réseau pour déterminer entièrement son profil d'indice.

3. Méthodologie de mesure

La mesure d'un champ de température ou d'une déformation longitudinale repose sur la reconstruction de l'argument $\psi(z)$ du coefficient de couplage du réseau de Bragg par la méthode exposée précédemment.

Tout d'abord, considérons qu'initialement, le réseau de Bragg se trouve soumis à une température et à une déformation longitudinale éventuellement non uniformes le long du réseau. Une première mesure donne $\psi_0(z)$ la phase du réseau dans cet état initial. Supposons qu'ensuite, la température et la déformation varient et notons $\Delta T(z)$ et $\varepsilon(z)$ les écarts par rapport à l'état initial. Une nouvelle mesure de la phase $\psi(z)$ correspond alors à ce second état et $\psi(z)$ est reliée à $\psi_0(z)$, $\Delta T(z)$ et $\varepsilon(z)$ par :

$$\Psi(z) - \Psi_0(z) = \int_0^z \left(K_\varepsilon^\Psi \varepsilon(z') + K_{\Delta T}^\Psi \Delta T(z') \right) dz' \quad (\text{eq. 7})$$

Comme pour la technique basée sur la mesure du décalage spectral, les variations de température et de déformation longitudinales doivent être mesurées séparément en s'assurant que $\Delta T(z)$ ou $\varepsilon(z)$ ne varient pas entre l'état initial et final lors des mesures de la phase du réseau de Bragg. Par ailleurs, l'étalonnage des coefficients $K_{\Delta T}^\Psi$ et K_ε^Ψ est également nécessaire.

Pour tester la méthode de mesure de déformation longitudinale non uniforme, un bloc de résine (dimensions: 200x32x8 mm) avec à l'intérieur un réseau de Bragg fibré a été fabriqué et sollicité en traction sur un banc de traction à une température fixe. Le réseau de Bragg a été placé dans le sens de la longueur et au centre du bloc de résine. Il s'agit d'un réseau uniforme de 11 mm de long et photo-inscrit par la technique du masque de phase dans une fibre SMF28 dopée au germanium. La résine utilisée est de l'Axson Epolam 2020 qui a été polymérisée à température ambiante. Après démoulage du bloc de résine, le réseau de Bragg a été calibré pour déterminer le coefficient K_ε^Ψ qui lui est caractéristique. Pour cet étalonnage, le réseau de Bragg a été soumis à des déformations uniformes obtenues par traction à l'aide d'un banc de mesures spécialement dédié.

Différentes forces de traction (mesurées à l'aide d'un capteur de force) peuvent être appliquées grâce à une vis de serrage. Un extensomètre placé sur le dessus du bloc de résine a permis d'étalonner le réseau de Bragg et une valeur de $1,1 \cdot 10^2 \mu\varepsilon \cdot \text{mm/rad}$ a été déterminée pour le coefficient K_ε^Ψ . Après cet étalonnage, deux trous symétriques ont été percés à travers le bloc de résine, de part et d'autre du réseau de Bragg (Fig. 1). La présence de ces deux trous permet de créer une déformation non uniforme, dans le sens de la longueur du bloc de résine lors d'une traction longitudinale.

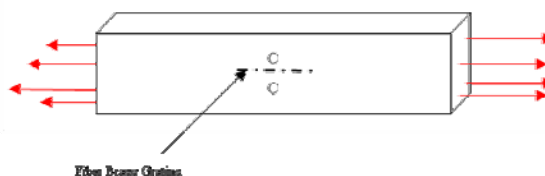


Fig. 1 : Eproutette instrumentée sollicitée en traction

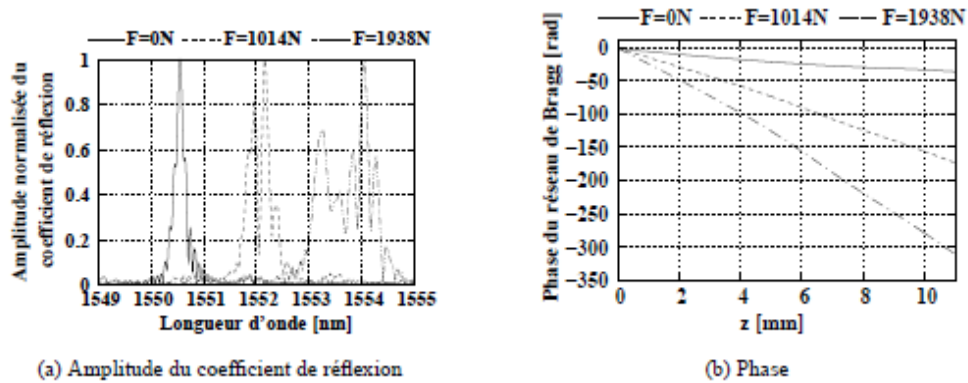


Fig. 1: Amplitude du coefficient de réflexion et de phase du réseau de Bragg en traction.

La figure 2a présente l'amplitude du coefficient de réflexion du réseau de Bragg du bloc de résine percé pour différentes forces de traction. Plus la force de traction est élevée, plus le spectre du réseau se déforme et se décale vers les grandes longueurs d'onde. La modification du spectre est caractéristique d'une déformation non uniforme qui s'exerce le long du réseau de Bragg.

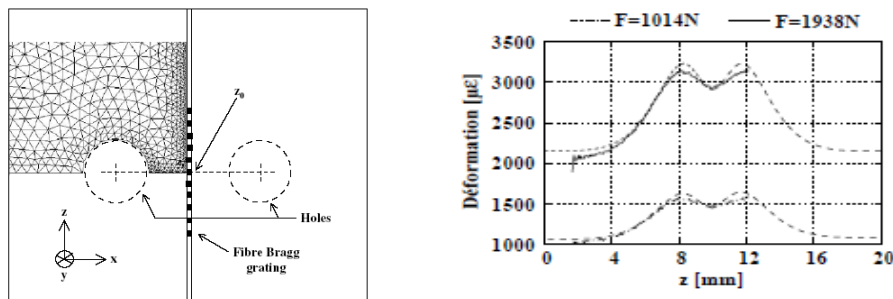


Fig 2: Déformations non uniformes mesurées à partir de la phase du réseau (trait plein) et simulées par éléments finis (pointillées)

A partir des phases du réseau obtenues pour différentes forces de traction (voir figure 2b), les déformations longitudinales non uniformes du bloc de résine sont déterminées en utilisant l'équation 7. La figure 3 présente ces déformations et montre le bon accord entre celles obtenues expérimentalement et celles simulées par la méthode des éléments finis (<http://www-cast3m.cea.fr>)

4. Application aux matériaux composites

4.1 Insertion du réseau dans un stratifié

Des plaques en fibres de verre ont été réalisées à l'aide de nappes unidirectionnelles de 300g/m². La séquence d'empilement choisie était [0,90]_{4S}. Pour permettre un démoulage aisé des plaques, la stratification a été réalisée entre deux films polyester qui n'ont pas été retirés après la polymérisation. Une tige de 0,4 mm de diamètre a permis de percer les films polyester et de réaliser un passage entre les fibres de verre imprégnées de résine non encore polymérisée. Un réseau de Bragg a alors été intégré à 45° dans la plaque. Le réseau a ici une longueur de 10mm et il est implanté sur une longueur d'environ 8mm dans le composite.

Le réseau a été sondé par interférométrie et son profil d'indice a été reconstruit avant insertion dans le composite et après polymérisation de la résine. La figure 4 présente la phase du coefficient de couplage du réseau dans ces deux états. En théorie, tous les paramètres du réseau, comme le coefficient de réflexion, l'amplitude de modulation ou l'indice effectif moyen, sont affectés par le retrait du matériau, du profil d'indice.

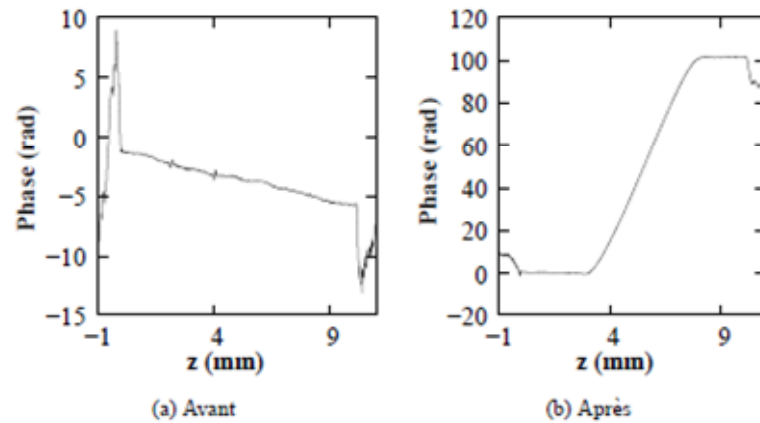


Fig 3: Phase du réseau avant et après encapsulation.

Notre objectif étant de déterminer un gradient de déformation, nous focaliserons notre attention sur la phase. La polymérisation ayant lieu à température ambiante, le terme ΔT de la relation (7) est nul, la différence des deux phases permet alors de déterminer la déformation du réseau (cf Fig. 5). Le réseau est lié au stratifié entre les abscisses $z=1\text{mm}$ et $z=9\text{mm}$ environ.

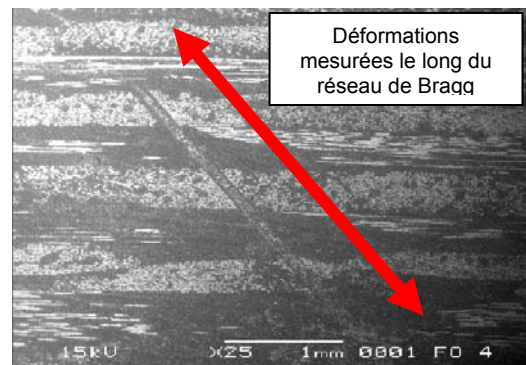
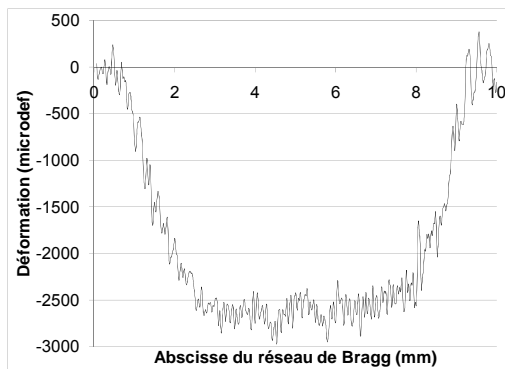


Fig 4: Réponse du réseau de Bragg placée dans un matériau composite et coupe microscopique mettant en évidence la position de la fibre optique dans le matériau stratifié.

L'évolution progressive de la déformation entre 0 et $-2500\mu\epsilon$ peut être liée au scénario de polymérisation et à une intrusivité significative de la fibre. En effet, la fibre optique, bien que de diamètre faible ($125\ \mu\text{m}$), traverse un milieu qui s'est solidifié tout en subissant un retrait. De plus, le milieu traversé présente un module élastique très inférieur à celle de la fibre optique, ce qui peut justifier aussi la présence de gradients aux bords de la plaque. Les modèles simples de la littérature supposent un retrait uniforme dans l'épaisseur, alors que la mesure a montré des évolutions importantes au voisinage des bords de la plaque. Une modélisation plus complète incluant le réseau de Bragg pourrait probablement mieux expliquer cette différence, mais il demeure la question de la cinétique de polymérisation qui nécessiterait à nouveau d'adopter des hypothèses simplificatrices faute de données sur le scénario mécanique de solidification en présence de la fibre optique.

4.2 Essais de flexion

Une fois le capteur inséré dans l'échantillon stratifié, il devient possible de l'utiliser comme capteur de déformation in-situ pour relever un éventuel gradient qui va lui être imposé par essai de flexion suivant deux configurations : une flexion 4 points symétrique où le réseau de Bragg est situé dans une zone de flexion pure (Fig. 8a), et une flexion 4 points anti-symétrique où seul un effort tranchant agit sur la section instrumentée par fibre optique (Fig. 8b).

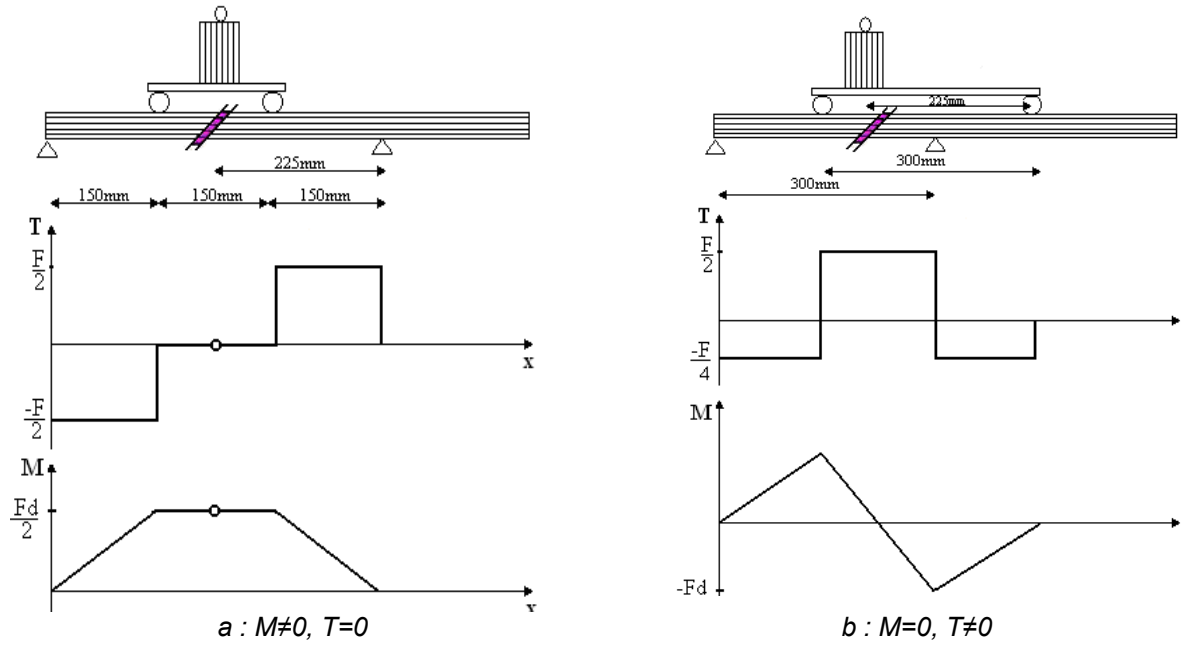
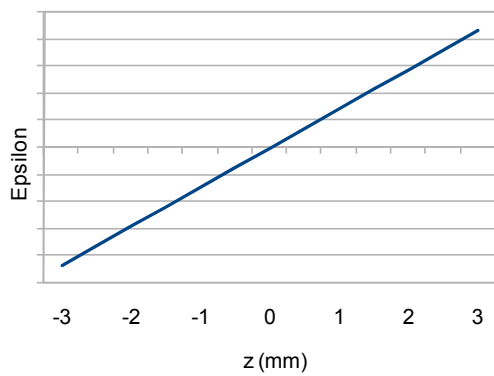
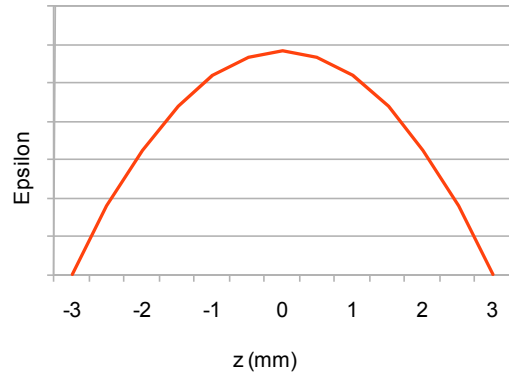


Fig 8: Essai de flexion 4 points



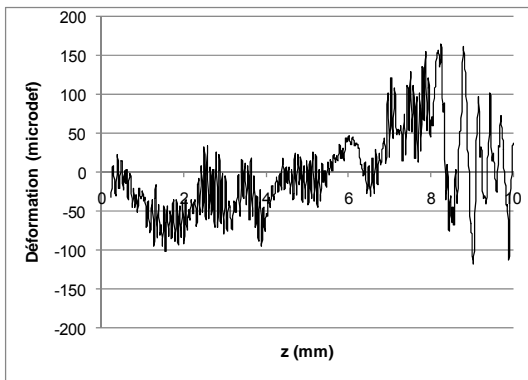
Déformations normale – $M \neq 0, T = 0$



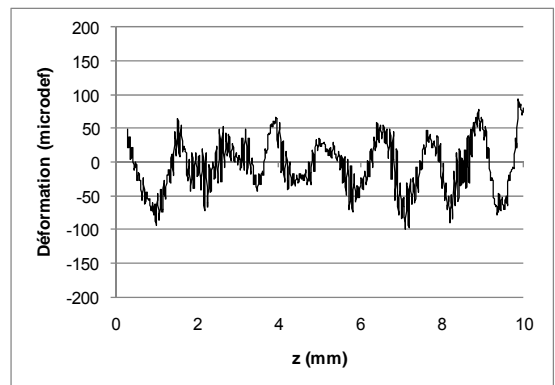
Déformation de cisaillement - $M = 0, T \neq 0$

Fig. 9 : Allure des gradients de déformation théoriques

Le signal de phase relevé sur la fibre optique contient un bruit de mesure trop important devant le niveau de déformation à déduire. Il nécessite un traitement numérique de filtrage qui est dans un premier temps appliqué sans rechercher à analyser un gradient qui apparaîtrait au sein de chaque pli constituant l'empilement stratifié. Les allures des profils de déformation mesurées avec le réseau de Bragg sont les suivantes :



Déformation – $M \neq 0, T = 0$



Déformation - $M = 0, T \neq 0$

Fig. 10 : Allure des gradients de déformation mesurés à l'aide du réseau de Bragg.

On note un bruit de mesure résiduel, mais au-delà on peut imaginer que la séquence des 16 plis du stratifié $[0,90]_{4S}$ est à l'origine des fluctuations périodiques des courbes de la figure 10. Ces profils peuvent également révéler le désordre interne provoqué par le passage de la fibre optique à travers les plis. Ainsi, il est particulièrement hasardeux de formuler des conclusions sur la corrélation essais-calculs à ce stade des développements.

5. Conclusion

Dans ce papier, nous décrivons une méthode de mesure de déformation basée sur la reconstruction du profil d'indice de réseaux de Bragg fibrés. L'avantage de cette méthode est double :

- Elle permet de mesurer des déformations au cœur des matériaux, dépassant ainsi une limite des méthodes classiques qui ne fournissent que des informations de surface;
- Elle permet de mesurer des déformations non uniformes.

La méthode a été appliquée avec succès à l'étude du profil de déformation au sein d'une éprouvette constituée de résine pure. L'accord entre les mesures et les simulations par éléments finis a démontré la validité de la méthode.

Cette approche est adaptée aux matériaux composites stratifiés où les déformations sont susceptibles d'être fortement non uniformes. Ainsi, des mesures ont été effectuées en intégrant un réseau de Bragg à travers une éprouvette stratifiée. Ces mesures ont révélé d'importantes déformations au stade de la consolidation, puis des gradients importants sous l'effet des chargements mécaniques, dont l'origine mécanique précise reste à déterminer. En perspective, il est utile de reproduire des essais complémentaires avec fibres optiques, puis de développer une modélisation associée prenant en compte la déformabilité de chaque pli au voisinage du capteur.

Références

- [1] K. Hill, Y. Fujii, D. Johnson, and B. Kawasaki. *Applied Physics Letters*, 32 :647–649, 1978.
- [2] A. Kersey, T. Berkoff, and W. Morey. *Electron. Lett.*, 28 :236–238, 1992.
- [3] Y.-J. Zhao and Y. Liao. *Opt. Lasers Eng.*, 41 :1–18, 2004.
- [4] R. Kashyap. *Fiber Bragg gratings*. Optics and Photonics, Academic Press, 1999.
- [5] J. Sipe, L. Poladian, and C. Martijn de Sterke. *Journal of the Optical Society of America A*, 11(4) :1307–1320, 1994.
- [6] C. Lupi, D. Leduc, G. Normand, R. Le Ny, and C. Boisrobert. *MTOI 2000*, pages 171–176, 2000.
- [7] D. Leduc, X. Chapeleau, C. Lupi, R. Le Ny, and C. Boisrobert. *Journal of Optics A : Pure and Applied Optics*, 5 :124–128, 2003.
- [8] J. Skaar, L. Wang, and T. Erdogan. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 37(2) :165–173, 2001.
- [9] X. Chapeleau, D. Leduc, C. Lupi, F. L'opez-Gejo, M. Douay, R. Le Ny, and C. Boisrobert. *Applied Optics*, 45 :728–735, February 2006.