



HAL
open science

Déformations à coeur et en surface sur éprouvette technologique en composite

Matthieu Mulle, Redouane Zitoune, Francis Collombet, Laurent Robert,
Yves-Henri Grunevald

► **To cite this version:**

Matthieu Mulle, Redouane Zitoune, Francis Collombet, Laurent Robert, Yves-Henri Grunevald. Déformations à coeur et en surface sur éprouvette technologique en composite: Essais de flexion 3 et 4 points. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01493725

HAL Id: hal-01493725

<https://hal.science/hal-01493725>

Submitted on 22 Mar 2017

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.

Public Domain

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.

Déformations à cœur et en surface sur éprouvette technologique en composite - Essais de flexion 3 et 4 points

Matthieu Mulle* **, Redouane Zitoune*, Francis Collombet*, Laurent Robert*, Yves-Henri Grunevald****

* *Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse, équipe PRO²COM - IUT Paul Sabatier, Dépt. GMP, 133c av. de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 4
matthieu.mulle@iut-tlse3.fr*

** *DDL Consultants, Pas de Pouyen, 83330 Le Beausset*

*** *CROMeP, Ecole des Mines d'Albi Carmaux, 81013 Albi CT*

RÉSUMÉ. Une éprouvette technologique en matériau composite dotée d'une instrumentation à cœur par fibre optique à réseaux de Bragg (RB) est soumise à des essais de flexion 3 et 4 points afin d'analyser le matériau au sein de la structure. L'éprouvette de type poutre présente une zone centrale renforcée. Les RB sont intégrés et répartis dans l'épaisseur de cette zone pour estimer la distribution des déformations lors des sollicitations. Des champs de déformation obtenus par corrélation d'images numériques délivrent des informations en surface. Les deux techniques de mesure montrent que la distribution est globalement linéaire. Un dialogue essai-calcul est établi dans le cadre de l'essai de flexion 4 points. Les modules de traction et de compression sont ajustés. Le modèle et les paramètres adjoints sont exploités pour la sollicitation en flexion 3 points. Une bonne corrélation avec les valeurs expérimentales est observée à l'échelle des efforts.

ABSTRACT. A composite technological specimen instrumented with embedded optical fiber Bragg gratings (FBG) is submitted to 3 and 4 points bending tests in order to analyse the material properties existing within the structure. The specimen is of beam type and presents a central reinforced zone. FBGs are embedded and spread through the thickness of this zone in order to estimate the strain distribution during solicitations. Surface strain fields measurements are obtained thanks to digital image correlation. Both techniques show a general linear distribution of these strains. A test-calculation dialogue is undertaken in the frame of the 4 points bending test. Young's moduli in the tensile and compressive directions are mainly adjusted. The numerical model and its associated parameters are used to simulate the 3 points bending test. A good correlation is observed with experiment as far as the effort scale is concerned.

MOTS-CLÉS : éprouvette technologique, réseaux de Bragg, champs de déformation, corrélation d'images numériques, simulation numérique.

KEYWORDS: technological specimen, Bragg gratings, strain fields, digital image correlation, numerical simulation.

1. Introduction

La conception des structures en matériaux composites présente des obstacles liés à la multiplicité des échelles en présence, à la complexité de la réponse mécanique, à la méconnaissance de l'état du matériau dans la structure ainsi qu'aux inévitables variabilités des propriétés liées aux différentes mise en œuvre (des constituants de bases à la pièce composite finale). Habituellement, les propriétés matériaux sont déduites d'essais réalisés sur des éprouvettes élémentaires qui sont la base de la pyramide des essais. Pourtant l'identification des paramètres matériau n'a réellement de sens que si la réponse du matériau composite est étudiée au sein de la structure. Pour répondre à cette problématique un concept d'éprouvette technologique est développé dans le cadre d'un programme de recherche national AMERICO (Analyse Multi Echelle – Recherche Innovante sur les Composites) fédéré par l'ONERA. Il vise à élaborer des méthodologies de calculs multi-échelles pour la conception de structures en matériau composite. Il s'agit d'une éprouvette représentative d'éléments de structures industrielles (de par la présence de singularités conceptuelles telles que les fortes épaisseurs, les reprises de plis et les zones de renforts). L'analyse du matériau dans cette structure est obtenue grâce à l'incorporation stratégique de capteurs fibre optique à réseaux de Bragg (RB) au sein même de l'éprouvette (Grunevald *et al.*, 2003). Une première phase de l'étude a concerné la validation des mesures ainsi que l'analyse de la zone courante (Cf. figure 1) par croisement essai-calcul (Grunevald *et al.*, 2003) et (Mulle *et al.*, 2003). L'étude présentée ici est la suite de ces travaux. Plusieurs capteurs RB sont répartis dans l'épaisseur de la zone de renfort pour estimer la distribution des déformations lors de sollicitation en flexion 3 et 4 points. La flexion 4 points est particulièrement intéressante car elle permet de disposer d'une zone, entre les appuis centraux, où l'effet de cisaillement est minimisé et où dans un même pli la déformation axiale est constante (démarche différente de Bosia *et al.*, 2004). Dans ces conditions les erreurs de positionnement des capteurs RB sont négligeables. Des mesures de champs de déformation obtenues par corrélation d'images numériques (CIN), viennent compléter les informations délivrées par RB grâce à leur capacité à effectuer des mesures en surface et particulièrement des mesures de déformations en cisaillement. Un dialogue essais calcul est ensuite établi pour identifier un jeu de propriétés qui permette une corrélation aussi proche que possible avec les mesures obtenues aux échelles globale puis locale. Les propriétés sont d'abord " ajustées " dans le cadre de l'essai de flexion 4 points pour les raisons évoquées plus haut. Ainsi, nous agissons essentiellement sur les modules de traction et de compression. Nous vérifions ensuite que le modèle et les paramètres adjoints sont exploitables pour l'autre mode de sollicitation, la flexion 3 points.

2. Eprouvette technologique (ET)

Les dimensions de l'ET sont présentées sur la figure 1. Elle est réalisée à partir de nappes de préimprégné carbone – époxy Hexply M21-T700 après cuisson

autoclave. La séquence d'empilement dans la zone courante est $[0/45/0/-45/90/0/-45/0/45/0]_s$. Pour créer la zone renforcée, on intègre un "patch" $[45/90/-45/0]_s$ entre les 2 demi épaisseurs de la zone courante pour obtenir la séquence totale suivante $[0/45/0/-45/90/0/-45/0/45/0/45/90/-45/0]_s$. Le premier pli (noté pli n°1) de cette séquence est le pli inférieur. L'éprouvette est dotée de 4 capteurs RB placés dans la zone renforcée (à 20 mm du centre de l'ET) entre les plis 3, 10, 19 et 26.

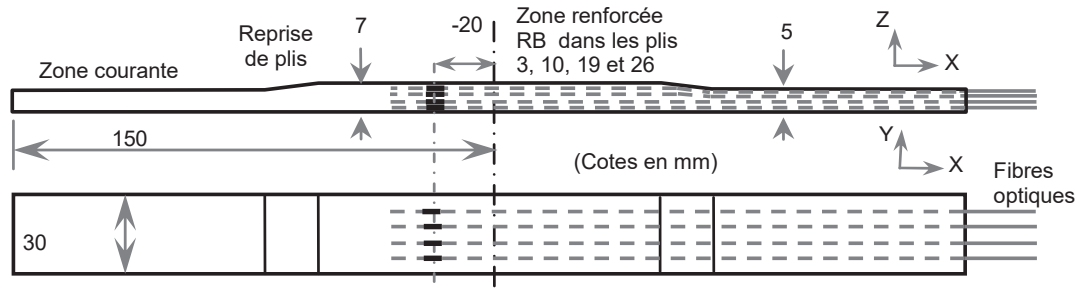


Figure 1. Schéma de l'éprouvette technologique, géométrie et instrumentation.

3. Mesures par fibre optique à réseau de Bragg (RB)

Un réseau de Bragg sur fibre optique consiste en une modulation périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre. Cette structure se comporte comme un miroir pour une bande spectrale très fine centrée autour d'une longueur d'onde caractéristique dite de Bragg. Lorsque le RB est soumis à une sollicitation thermomécanique le spectre réfléchi se décale. La variation de longueur de Bragg est donc proportionnelle à la variation de température et à la déformation axiale. Dans des conditions isothermes, ces déformations ε_{xx} sont calculées comme suit :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b \cdot b} \quad [1]$$

avec λ_B la longueur d'onde de Bragg et b une constante opto élastique propre à la fibre optique utilisée.

4. Dispositif et procédure expérimentaux

Les essais sont réalisés à l'aide d'une machine d'essais mécanique INSTRON. Pour les flexions 3 et 4 points les appuis inférieurs sont espacés de 250 mm. Les appuis supérieurs sont espacés de 80 mm pour la flexion 4 points. Pour chacune des sollicitations, les mesures sont relevées tous les 2 mm du déplacement de vérin jusqu'à 16 mm, puis pendant le déchargement. La machine est arrêtée à chacune de ces positions afin de relever une valeur précise de l'effort et de prendre une photo numérique pour la mesure de champs. Les longueurs d'ondes de Bragg sont enregistrées en continu durant la totalité de l'essai grâce au système Micron Optics si425. L'acquisition des images numériques est effectuée à l'aide d'une caméra CCD Qimaging Retiga 1300 dont la résolution est de 1280 x 1024 pixels et qui est

équipée d'un téléobjectif Nikkor 28-70 mm. Le logiciel de dépouillement des images est VIC 2D.

5. Modèle numérique

Des éléments finis de volume composite de type 11 de degré 1 (une étude avec des éléments de degré 2 montre que ces derniers n'apportent pas de complément significatif) sont utilisés (disponibles dans la bibliothèque du code SAMCEF). Le modèle (Collombet *et al.*, 2006) comporte 3 éléments dans la zone centrale et deux dans la zone courante représentant 1040 éléments au total et 6264 degrés de liberté. Les dimensions des éléments dans le sens x, y et z sont respectivement 3 mm, 6 mm et 2,6 mm à l'exception de la zone de reprise de plis où la dimension de l'élément dans le sens Z est de 2,1 mm. Le chargement s'effectue à l'aide de conditions en déplacements imposés. Pour éviter les modes rigides des nœuds sont bloqués selon les axes X et Y. Les propriétés mécaniques initiales utilisées dans cette modélisation sont celles identifiées à partir d'essais normés sur éprouvettes élémentaires.

6. Résultats et discussions

Dans un premier temps, l'analyse est effectuée à l'échelle globale. Une comparaison entre les efforts mesurés et ceux calculés numériquement en fonction de la flèche centrale est donnée dans la figure 2. Expérimentalement, on note une évolution linéaire jusqu'à 10 mm de flèche. Jusque là, l'écart observé est de l'ordre de 6 %. Au-delà de 10 mm de flèche, une inflexion est observée et l'écart avec la courbe numérique augmente. Ceci s'explique par le comportement non linéaire géométrique et/ou matériau de l'éprouvette ainsi sollicitée, non pris en compte par le modèle. Dans un deuxième temps, une analyse à l'échelle des déformations est effectuée. La figure 3 présente les champs de déformation ε_{xx} dans la zone de renfort entre les appuis centraux, pour un déplacement vérin de 16 mm. Les mesures affichées sur l'image correspondent à la projection des 4 RB (situés à cœur) sur la tranche de l'éprouvette. Pour chacune de ces mesures, les champs de déformation sont "moyennés" sur la longueur des RB, soit environ 10 mm. On constate l'uniformité des déformations longitudinales dans un même pli et donc le long des RB (fig. 3, à gauche). Cela nous permet de prétendre à une mesure de bonne qualité. En revanche, on note la présence de déformations de cisaillement ε_{xz} réparties suivant des bandes longitudinales. Ceci peut s'expliquer par l'effet dû à l'interaction entre le "patch" de renfort et les parties encadrantes. De même, il peut provenir du non respect de la symétrie miroir au niveau de la reprise de plis qui crée un couplage entre les éléments de la matrice de rigidité selon la théorie classique des stratifiés. Cet effet affecte toute la zone centrale (fig. 3). Les distributions des déformations dans l'épaisseur (délivrées par chaque technique de mesures (RB, CIN) ou de calculs (MEF)) sont révélées par une construction graphique qui relie chaque point de mesure pour un déplacement donné (fig. 2). On observe un comportement

globalement linéaire par chaque technique. Cependant, les lignes construites ne présentent pas les mêmes pentes. Les lignes de distributions obtenues par MC pour les 4 déplacements se croisent en un même point mais celui-ci est très différent pour les mesures par RB et les calculs par MEF. Pour ces dernières, le point d'intersection est le plus proche de la fibre neutre théorique. Les déformations obtenues par CIN concordent bien avec les mesures par RB dans la partie inférieure de l'éprouvette (sollicitée en traction), tandis que dans la partie supérieure (sollicitée en compression) des écarts de l'ordre de 12 % sont constatés.

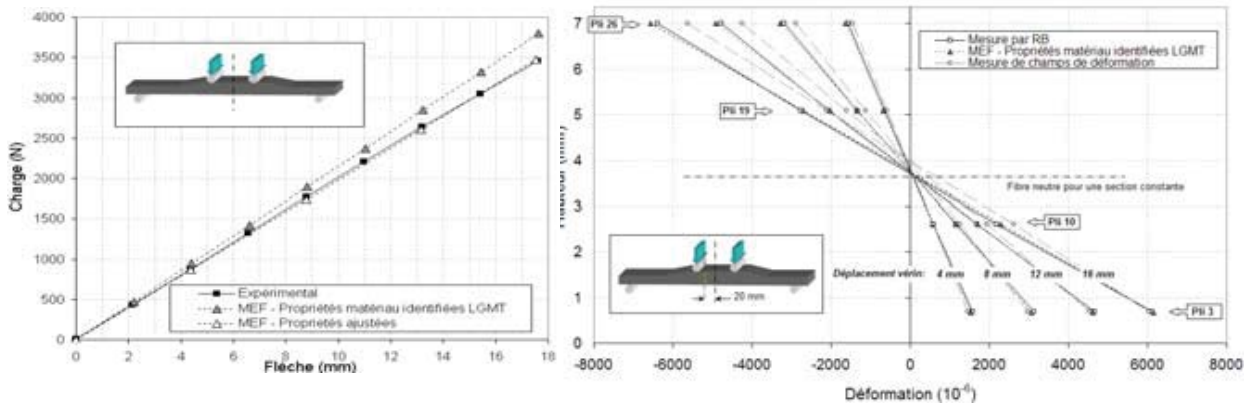


Figure 2. Flex. 4 pts; à gauche, efforts mesurés et calculés en fonction de la flèche; à droite, déformations longi. ϵ_{xx} dans l'épaisseur mesurées (RB et CIN) et calculées.

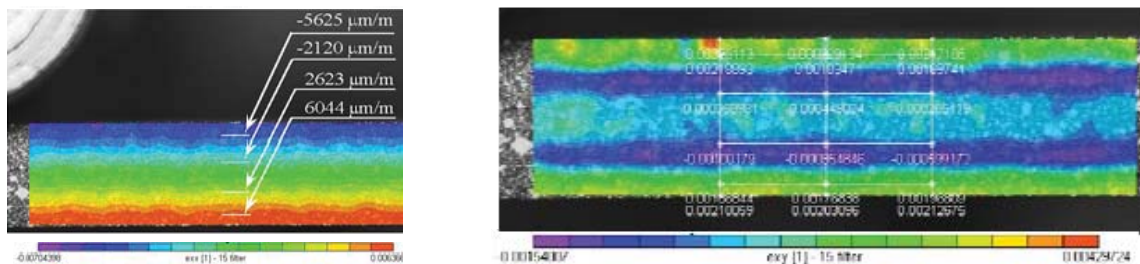


Figure 3. Champ de déformations par CIN dans la zone de renfort en flexion 4 pts pour un dépl. de 16 mm; (à gauche) déf. ϵ_{xx} , (à droite) déf. de cisaillement ϵ_{xz} .

Nous cherchons à minimiser les écarts observés entre les mesures et la simulation numérique. Pour cela un dialogue essais/calcul est entrepris. La corrélation est effectuée pour des déplacements inférieurs à 10 mm (du fait de la non linéarité expérimentale observée au-delà). Il s'agit d'un calcul itératif aux échelles des efforts puis celles des déformations. Les propriétés principalement ajustées sont les modules de Young sens long en traction et en compression (E_{lt} , E_{lc}). Les propriétés finales obtenues après ajustement sont 113 GPa pour le module de traction et de 105 GPa pour le module de compression. Elles présentent un écart respectivement de 12.8 % et de 11.7 % avec les propriétés identifiées sur des éprouvettes élémentaires normalisées. Maintenant ces propriétés sont utilisées dans le cadre de la simulation d'un essai de flexion 3 points. A l'échelle macroscopique, les résultats montrent un bon accord avec les valeurs expérimentales (fig. 4). A l'échelle des déformations, des écarts significatifs sont constatés pour les plis

extérieurs (de l'ordre de 18 %). Pour les plis intérieurs, les écarts sont faibles. Ces différences peuvent provenir d'éventuels écarts de positionnement des capteurs. Ils ont une influence pour ce mode de sollicitation puisque les déformations ne sont pas constantes le long du pli. Pour la flexion 4 points ce problème ne se pose pas car les déformations sont constantes dans un même pli entre les appuis centraux.

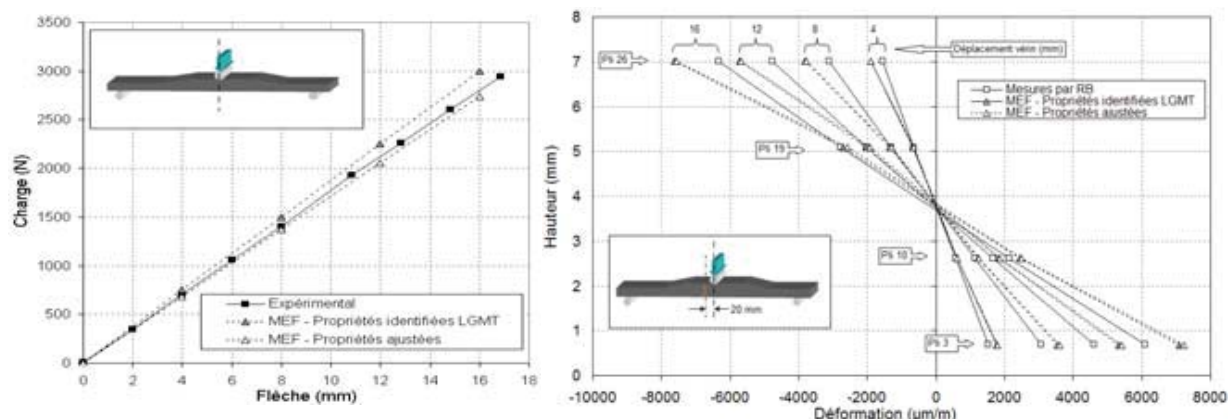


Figure 4. Flex 3 pts; à gauche, efforts mesurés et calculés en fonction de la flèche; à droite, déformations longitudinales dans l'épaisseur mesurées (RB) et calculées.

7. Conclusion

La zone renforcée d'une éprouvette technologique (ET) est étudiée lors d'essais de flexion 3 et 4 points. Une distribution linéaire des déformations est observée à travers l'épaisseur dans le cas de la flexion 4 points. Grâce à une modélisation numérique, un jeu de propriétés mécaniques associé à cette sollicitation est identifié par analyse croisée des résultats obtenus à l'échelle mésoscopique et ceux obtenus à l'échelle macroscopique. Ce même jeu est exploité pour simuler la flexion 3 points. Une bonne corrélation avec les valeurs expérimentales est observée à l'échelle des efforts. Des écarts apparaissent entre les déformations mesurées et calculées mettant en évidence des incertitudes concernant le positionnement des capteurs RB.

8. Bibliographie

- Grunevald Y.-H., Collombet F., Mulle, M., Ferdinand P., "Global approach and multi-scale instrumentation of composite structures in the field of transportation", in *Proc. of 8th Japan International SAMPE Symposium*, Tokyo, Japan, 2003, Vol. 2, pp. 665-675.
- Collombet F., Mulle M., Grunevald Y.-H., Zitoune R., "Contribution of embedded optical fiber with Bragg gratings in composite structures for tests-simulations dialogue", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 13, Issue 5, August 2006, pp. 429-439.
- Mulle M., Perié J.-N., Robert L., Collombet F., Grunevald Y.-H., "Mesures de champs par stéréocorrélation sur éprouvettes technologiques composites instrumentées par capteurs à fibre optique à réseaux de Bragg: comparaison et validation des mesures", *Instrumentation, Mesure, Métrologie*, 2005, vol. 5, n°1-2/2005, 24 pages.
- Bosia F. et al.; "Through-the-thickness distribution of strains in laminated composite plates subjected to bending", *Composite Science and Technology*, 64, 2004, pp. 71-82.