

Réseaux de Bragg enfouis pour la mesure des déformations au cœur d'un composite thermoplastique soumis à indentation quasi-statique et impact basse vitesse

Embedded Bragg gratings to assess internal strains in thermoplastic composites under quasi-static indentation and low-velocity impact

M. Mulle¹, A. Yudhanto¹, G. Lubineau¹, R. Yaldiz², W. Schijve², N. Verghese²

1 : King Abdullah University of Science and Technology (KAUST),
Physical Science and Engineering Division, COHMAS Laboratory,
Thuwal 23955-6900, Saudi Arabia
matthieu.mulle@kaust.edu.sa; gilles.lubineau@kaust.edu.sa;

2 : SABIC,
T&I Composites,
P.O Box 319,
6160 AH Geleen, the Netherlands

Résumé

Nous présentons une étude expérimentale sur le suivi des déformations au cœur de stratifiés composites thermoplastiques soumis à indentation quasi-statique et impact basse vitesse au moyen de capteurs fibre optique à réseaux de Bragg (FBG). L'objectif est d'évaluer l'intérêt et les limites de l'instrumentation à cœur pour des stratifiés de polypropylène renforcé de fibres de verre soumis à ces deux conditions de chargement classiques. Nous proposons une stratégie d'instrumentation ayant pour objectif de fournir un ensemble de valeurs fiables de déformations internes et de vitesses de déformation, ces données devant être utilisées pour l'analyse du comportement à l'endommagement et la validation d'un modèle numérique à l'échelle mésoscopique. En nous basant sur une procédure spécifique d'insertion de capteurs, différentes techniques de suivi et des observations optiques, nous montrons comment la méthodologie appliquée permet d'adresser des questions majeures portant sur la détermination de la position dans le plan et dans l'épaisseur des capteurs FBG, leur influence sur l'intégrité structurelle ou l'interprétation du spectre de longueur d'ondes qu'ils réfléchissent.

Abstract

We present an experimental study of in-core strain monitoring of thermoplastic composites subjected to quasi-static indentation and low-velocity impact using embedded fiber Bragg gratings (FBGs). The objective is to evaluate the interest and limitations of the embedded instrumentation in glass fiber-reinforced polypropylene laminates subjected to these two conventional loading conditions. We propose an instrumentation strategy with the objective of providing a set of reliable values of internal strain and strain rates, which can be used for the analysis of the damage behavior and the validation of a numerical mesoscale model of laminates. Based on a specific sensor insertion procedure, monitoring techniques and optical observations, we show how the applied methodology addresses major questions, such as determining the in-plane and through-thickness position of the embedded FBGs, their influence on the structural integrity or the interpretation of the wavelength spectrum they reflect.

Mots Clés : Composite thermoplastique ; Indentation quasi-statique ; Impact basse vitesse ; Réseaux de Bragg ; Suivi de déformations.

Keywords: Thermoplastic composite; Quasi-static indentation; Low-velocity impact; Fiber Bragg grating; Strain monitoring.

1. Introduction

Dans l'industrie automobile, le composite constitué de polypropylène renforcé de fibres de verre continues (GFPP) est largement utilisé pour la fabrication de composants structuraux. Cela est en partie dû à son faible coût, à sa capacité de recyclage et à son excellente résistance aux chocs [1]. Cependant, le comportement du GFPP sous chargement dynamique et à l'endommagement est encore mal connu et les modèles de prédiction associés sont peu développés [2]. Ces modèles sont confrontés au fort caractère viscoélastique et viscoplastique du matériau, qui implique la prise en compte précise de la vitesse de déformation [3, 4].

La vitesse de déformation est généralement mesurée à l'aide de jauges de déformations ou de méthodes par corrélation d'images numériques (DIC). Ces techniques ne peuvent mesurer que les déformations à la surface d'un échantillon et ne permettent donc pas d'évaluer la distribution des déformations dans l'épaisseur. Il existe pourtant des contraintes de cisaillement inter-laminaire qui induisent une répartition non linéaire des déformations dans l'épaisseur. Ainsi, des mesures à cœur sont souhaitables pour obtenir une description détaillée des déformations et des vitesses associées dans un stratifié soumis à des chargements dynamiques [5]. A cet effet, les capteurs fibre optique à réseaux de Bragg (FBG) sont de bons candidats car ils sont suffisamment petits pour être insérés dans les plis sans affecter les propriétés mécaniques du matériau hôte [6-8]. En ce qui concerne l'analyse d'impact à l'aide de FBG intégrés, différentes études présentent des méthodologies pour la détection dans le plan et la localisation de l'impact [9, 10]. Ces capteurs optiques ont aussi été utilisés pour caractériser le délaminage induit par un impact, mais les résultats ont montré des limites. Celles-ci sont liées à la difficulté de connaître précisément l'emplacement du capteur, son orientation ou les contraintes initiales qu'il subit [11]. D'autres problèmes sont liés à la complexité de la réponse du capteur lorsqu'il est dans une zone d'endommagement [12-15]. L'insertion des FBG au sein de stratifiés soulève également des questions liées à l'intégrité structurelle du matériau. Quelle est l'influence du capteur sur la réponse mesoscopique du composite lorsqu'il est soumis à un impact ? Affecte-t-il les propriétés mécaniques ou est-il initiateur de fissures ? Ces questions doivent donc être étudiées afin de valider ou non la fiabilité des mesures. Nous proposons une stratégie d'instrumentation par FBG qui permet de mesurer les déformations au sein d'un composite thermoplastique soumis à indentation quasi-statique (QSI) et à impact basse vitesse (LVI, Low Velocity Impact).

2. Matériel et méthodes

2.1 Matériau, éprouvettes et réseaux de Bragg

Le stratifié GFPP étudié est constitué de huit plis unidirectionnels. Une séquence d'empilement de $[0_2/90_2]$ a été choisie pour s'assurer que le délaminage ait principalement lieu aux interfaces 0/90 près des faces impactées et distales, guidant notre stratégie en matière d'instrumentation. Les stratifiés ont été fabriqués en utilisant un procédé de moulage sous presse chauffante. Un moule en acier a été spécialement conçu et fabriqué pour permettre l'instrumentation des stratifiés (*Fig. 1a*). Quatre rainures d'un côté et quatre autres du côté adjacent sont prévues pour le passage des câbles dans les orientations 0° et 90° , respectivement. Un stratifié peut ainsi être instrumenté avec huit fibres optiques. Cependant, nous verrons dans la section suivante que, pour des raisons pratiques, autant de fibres n'est pas souhaitable. Le type de moule et la description du cycle de pressage à chaud sont les mêmes que ceux décrits dans [16]. Les stratifiés ont une épaisseur d'environ 2 mm, une largeur de 110 mm et une longueur de 275 mm (la largeur et la longueur ont été respectivement définies en fonction des dimensions du pré-imprégné et du moule). Les stratifiés ont été découpés pour former une "éprouvette instrumentée" (avec FBG enfouis) et une "éprouvette nue" (non instrumentée). Chaque éprouvette mesure 110x110 mm (*Fig. 1b*). Cette approche nous permet de comparer deux éprouvettes fabriquées dans les mêmes conditions. Les essais d'indentation ont été effectués à une vitesse de 1,25 mm/min jusqu'à un déplacement de 6 mm. Quant aux essais d'impact, ils ont été réalisés avec un niveau d'énergie de 18J.

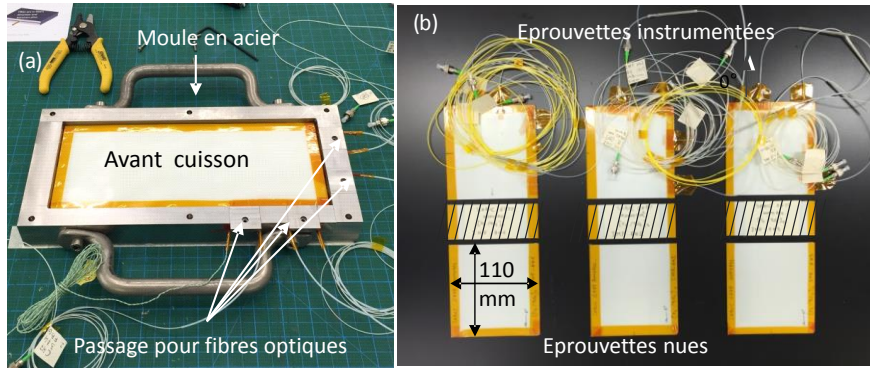


Fig. 1. a) Empilement de plis GFPP dans un moule acier avec instrumentation FBG. b) Echantillons instrumentés et non instrumentés (nus). Cette série de 6 échantillons est réalisée pour l'essai QSI. Une autre série est réalisée pour l'essai LVI.

Le principe de fonctionnement des FBG a déjà été décrit dans divers documents au cours des dernières décennies [6-8]. Nous rappelons au lecteur qu'un réseau de Bragg est une modulation périodique de l'indice de réfraction, inscrite par interférométrie UV dans le cœur d'une fibre optique (généralement monomode), sur quelques millimètres. Lorsqu'une source de lumière à large bande est couplée à la fibre optique contenant un FBG, les propriétés de diffraction du réseau favorisent la réflexion d'une bande de longueurs d'onde très étroite. Cette bande présente un pic singulier qui correspond à la longueur d'onde de Bragg λ_B . Lorsque le FBG est soumis à une contrainte axiale, le pic se décale proportionnellement. Sous température constante ($\Delta T = 0$), la déformation axiale est exprimée comme suit :

$$\epsilon_{xx} = \Delta\lambda_B / (\lambda_B \cdot K_\epsilon)$$

où K_ϵ ($0,78 \cdot 10^{-6}$) est le coefficient opto-mécanique de la fibre optique. Les FBG utilisés ici sont inscrits dans une fibre optique monomode standard SMF28e. Pour un transfert de charge efficace de la matrice au capteur, le revêtement acrylate de la fibre SMF28 est retiré le long des FBG. Le diamètre de la fibre nue est 125 μm .

2.2 Stratégie d'instrumentation

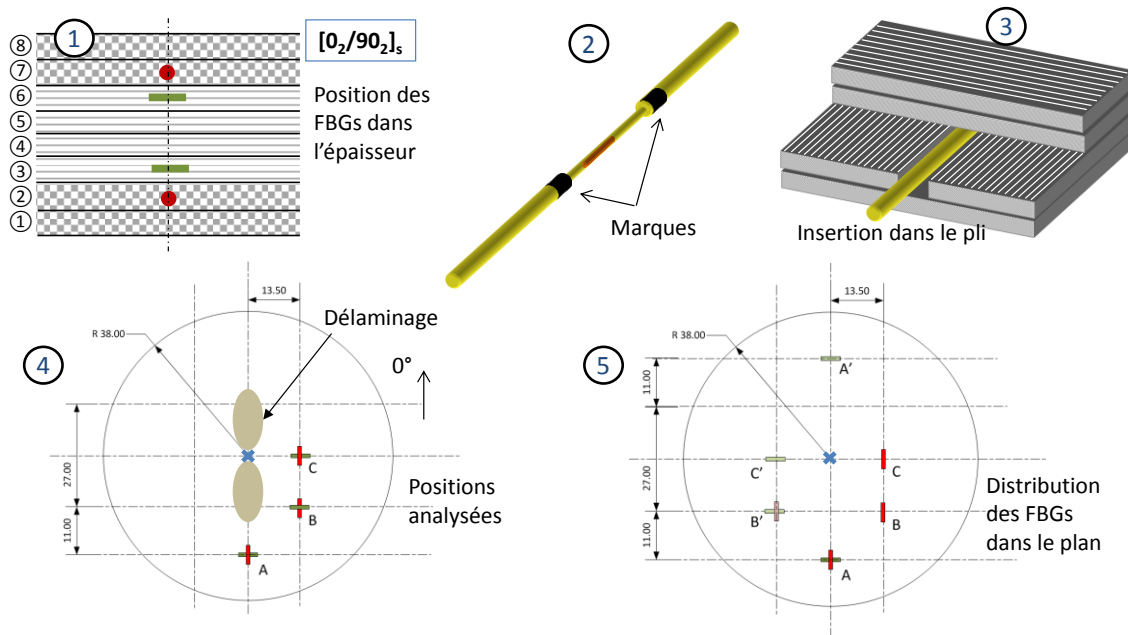


Fig. 2. Illustration des cinq points majeurs de la stratégie d'instrumentation (dimensions dans 4 et 5 en mm).

La stratégie d'instrumentation repose sur cinq points principaux (Fig. 2): 1) Les FBG sont placés de part et d'autre des plans de délaminage. 2) Les FBG sont marqués à chaque extrémité. Grâce à la translucidité du polypropylène, les marques peuvent être détectées à l'œil nu. 3) Trois positions dans le plan sont étudiées pour les interfaces 0/90 inférieure et supérieure. Les FBG sont intégrés dans la même direction que les fibres de renfort pour assurer un signal de haute qualité (12 FBG au total). 4) Les capteurs sont placés à une certaine distance du délaminage mais suffisamment proches pour pouvoir mesurer son influence sur le champ de déformation. 5) Pour éviter une concentration préjudiciable de FBG, les capteurs sont répartis sur trois éprouvettes. La Fig. 3 présente des schémas illustrant les positions dans le plan et dans l'épaisseur des FBG enfouis pour les trois éprouvettes.

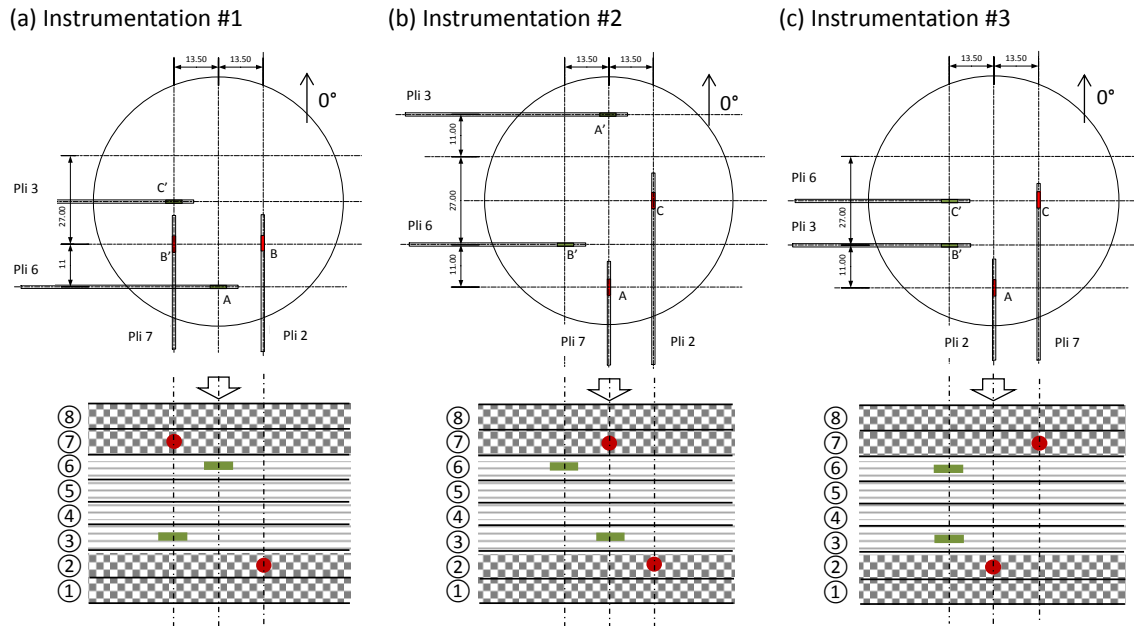


Fig. 3. Schémas montrant les positions dans le plan et dans l'épaisseur des FBG enfouis dans trois éprouvettes identiques selon des distributions différentes: (a) instrumentation #1, (b) instrumentation #2, (c) instrumentation #3.

2.3 Dispositifs expérimentaux et procédures

Le dispositif complet des essais QSI est présenté Fig. 4a. Les essais QSI ont été réalisés à l'aide d'un dispositif de maintien des éprouvettes spécifique monté dans un Instron 5882. La charge d'indentation a été appliquée à une vitesse de 1,25 mm/min, conformément à la norme ASTM D6264.

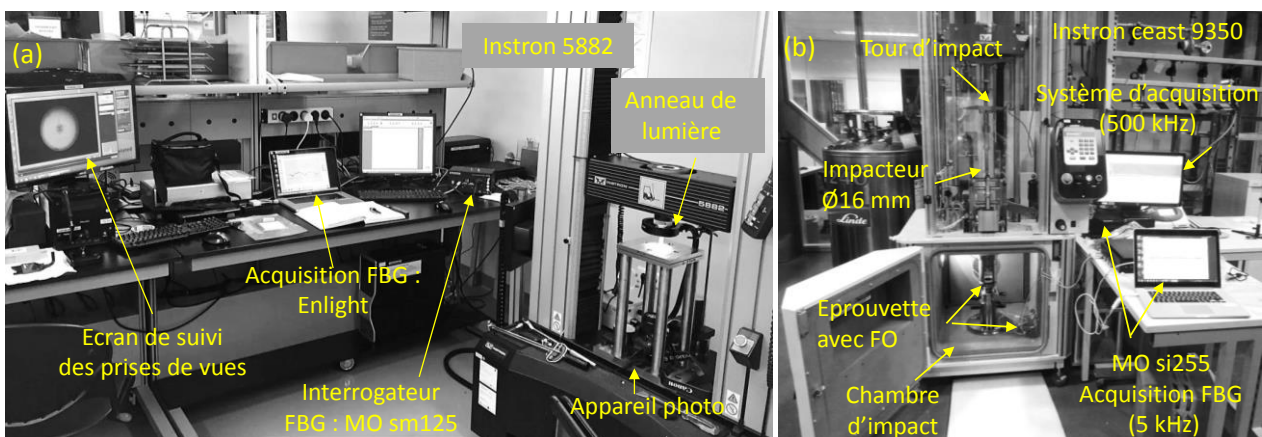


Fig. 4. Dispositifs expérimentaux : a) essai QSI, b) essai d'impact (LVI)

L'indenteur a une extrémité hémisphérique (diamètre de 16 mm). Les essais ont été effectués jusqu'à un déplacement de 6 mm et un retour au point initial. Sous l'éprouvette et le dispositif de maintien, une caméra numérique a été placée pour capturer la progression de l'endommagement. Cela a été possible grâce à la translucidité de la matrice PP et un anneau de lumière placé en contre-jour. Des images séquentielles contenant l'ombre de l'endommagement ont été prises tous les 1 mm de déplacement. Un MicronOptic sm125 a été utilisé pour interroger le signal (puissance réfléchie et longueur d'onde) provenant des FBG. Le décalage des pics de Bragg a été enregistré en continu avec un taux d'acquisition de 2 Hz, tandis qu'une réponse spectrale complète a été acquise tous les 1 mm de déplacement, comme pour le processus de prise de vue.

En raison de la rapidité du processus des essais LVI, les conditions de mesure de déformation interne sont très différentes de celles des essais QSI. Les essais LVI ont été réalisés à l'aide d'un Instron CEAST 9350. La configuration complète au cours de l'impact est illustrée *Fig. 4b*. L'impacteur a une pointe hémisphérique (diamètre de 16 mm, identique à celui de l'essai QSI) et une masse totale d'environ 5,4 kg. Les éprouvettes ont été maintenues à l'aide d'un système de serrage pneumatique avec une bride dotée d'une découpe circulaire (diamètre = 76 mm, identique à celui du dispositif QSI). L'impacteur a ensuite été placé à une hauteur de chute permettant d'atteindre une vitesse de 2,6 m/s, ce qui correspond à un niveau d'énergie d'impact de 18 J. Un MicronOptic si255 a été utilisé pour interroger les FBG. Le décalage des pics de Bragg a été enregistré en continu avec un taux d'acquisition de 5 kHz. Contrairement au test QSI, le laps de temps au moment de l'impact, qui était d'environ dix millisecondes, ne permettait pas l'enregistrement de la réponse spectrale lorsque la charge d'impact était appliquée. Néanmoins, nous avons enregistré la réponse spectrale complète avant et après le test d'impact.

3. Résultats et analyse

3.1 Visualisation dans le plan et identification des positions des FBG

La *Fig. 5* montre une photo d'une éprouvette avec instrumentation #1 éclairée sur la face opposée. Nous pouvons clairement détecter les marqueurs à l'extrémité des FBG apparaissant à travers la matrice de PP. Nous voyons que certains FBG ont légèrement migré de la position originale vers une coordonnée différente. Le centre du FBG au point A est légèrement décalé de l'axe longitudinal. Au point B nous voyons que le FBG n'est plus parallèle à ce même axe longitudinal. Ces décalages et ces désalignements sont induits pendant la phase de fabrication, lorsqu'un réarrangement des plis et du flux matriciel a lieu. Ils ne sont pas critiques s'ils peuvent être déterminés avec précision, et permettre une analyse fiable du comportement en déformation et une comparaison avec la simulation numérique.

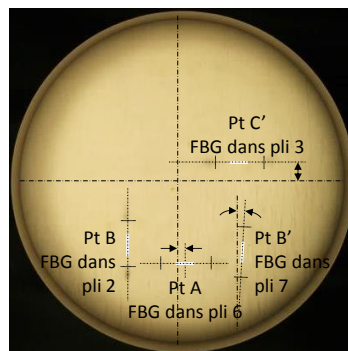


Fig. 5. Visualisation des marques de part et d'autre des FBG enfouis pour la détermination de leur position.

3.2. Indentation quasi-statique (QSI)

3.2.1. Influence sur le comportement macroscopique

Les courbes force/déplacement des éprouvettes nues et instrumentées sont présentées *Fig. 6a*. Nous observons un comportement similaire pour tous les stratifiés. À partir de ces résultats, il est difficile d'établir que les quatre FBG enfouis ont une influence ou non sur la réponse macroscopique du stratifié GFPP sous QSI.

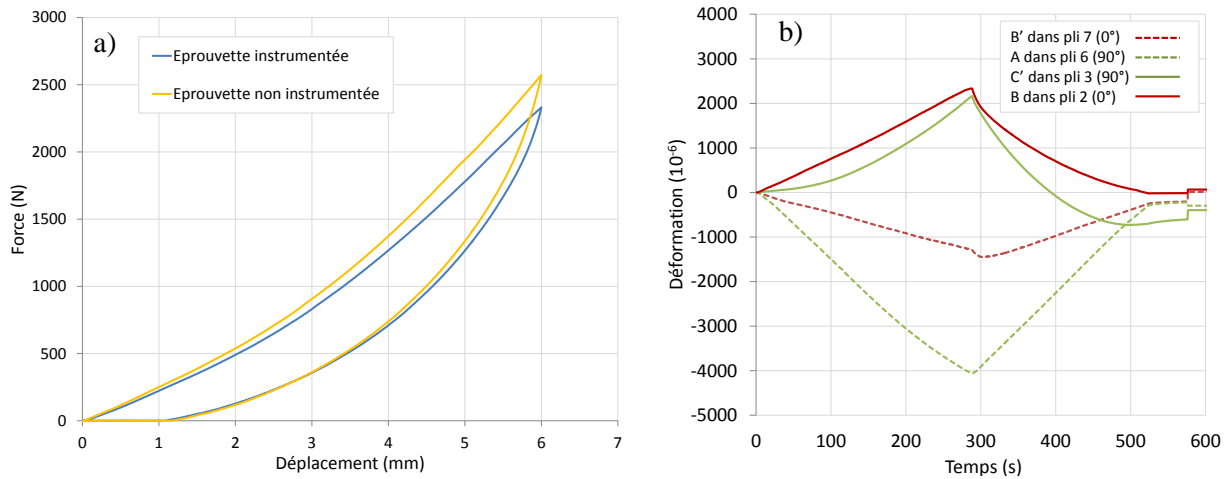


Fig.6. a) Courbes de charge en fonction du déplacement des éprouvettes nue et instrumentée #1 soumis aux essais QSI. b) Courbes de déformations mesurées à cœur en fonction du temps.

3.2.2. Influence sur l'endommagement

Pour évaluer l'influence de l'instrumentation à cœur sur l'endommagement, nous avons comparé les photos des éprouvettes instrumentées et nues après essai (Fig. 7 gauche). Une forme d'arachide typique des dommages est observée. La différence de surface de dommage est relativement faible. Nous avons observé un comportement similaire dans les autres séries d'éprouvettes (instrumentation #2 et #3 et éprouvettes nues associées). Par conséquent, il n'y a aucune évidence de l'influence des capteurs optiques sur le processus de délamination dans le stratifié GFPP sous QSI.

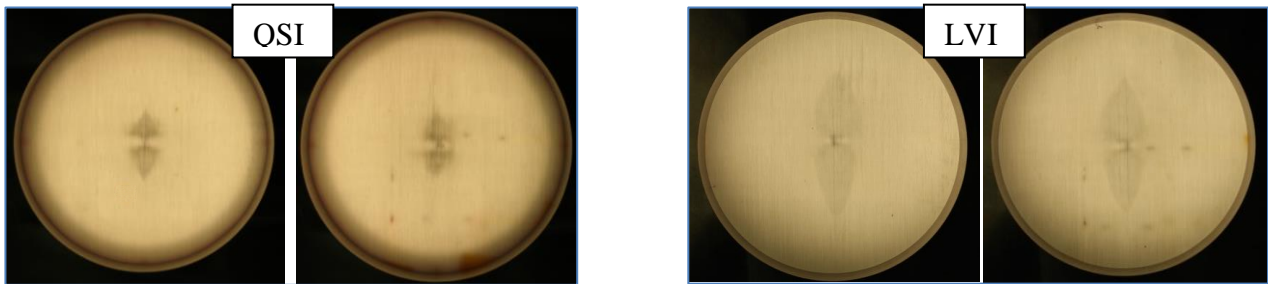


Fig.7. Photos de la face distale des éprouvettes nue et instrumentée, à gauche, après essais QSI, à droite, après impact LVI.

3.2.3. Réponse spectrale

L'analyse de la réponse spectrale permet de vérifier si nous avons une distribution de déformation uniforme ou non le long de la longueur du FBG. Pendant l'essai QSI, les réponses spectrales ont été enregistrées tous les 2 mm de déplacement. Les résultats sont rapportés en Fig. 8 pour l'éprouvette avec instrumentation #1. Les flèches au-dessus des spectres indiquent la progression du chargement de 0 à 6 mm de déplacement. Nous observons un élargissement croissant à la base de tous les spectres mais ceux-ci progressent avec un pic bien défini. Une valeur de longueur d'onde du pic de Bragg peut être déterminée à chaque niveau de déplacement. Dans de telles conditions, nous pouvons associer de manière fiable ces informations aux mesures de déformation. L'analyse du spectre au déchargement, non présentée ici, a montré la récupération complète du signal. Les réponses spectrales enregistrées pour les spécimens avec instrumentation #2 et #3 ont montré une tendance similaire. Par conséquent, selon cette analyse, nous pouvons dire que les mesures de déformations internes sont obtenues dans des conditions fiables.

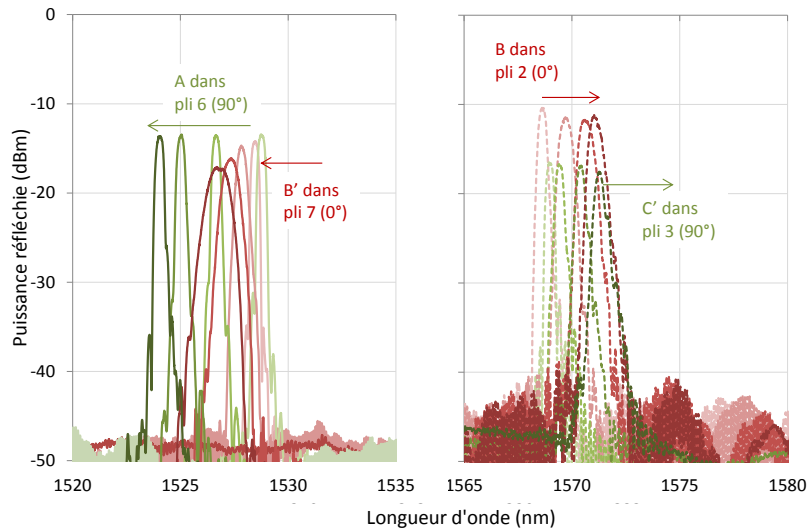


Fig.8. Réponse spectrale en longueur d'onde tous les 2 mm de déplacement pendant la phase de chargement QSI pour l'éprouvette avec instrumentation #1

3.2.4. Suivi des déformations à cœur

La Fig. 6b montre l'évolution des déformations au cœur de l'éprouvette avec instrumentation #1, en fonction du temps, pendant les phases de chargement et de déchargement. Les lignes en trait plein représentent les déformations en traction, se produisant dans des FBG situés au-dessous du plan médian dans les directions longitudinale (rouge) et transversale (vert) aux points B et C', respectivement. Les lignes en pointillés représentent les déformations en compression, se produisant dans les FBG positionnés au-dessus du plan médian. Les courbes ne révèlent pas forcément un comportement linéaire. Dans le cas des déformations dans les plis à 90°, différentes vitesses de déformation sont observées en fonction du temps (ou du déplacement). Nous observons également que la réponse en déformation lors du déchargement ne suit pas le même chemin que lors du chargement. Cela est dû aux dommages créés lors du chargement qui ont affecté les propriétés mécaniques du stratifié. Enfin, des déformations résiduelles sont observées à la fin de l'essai, notamment pour les FBG placés en A et C' (plis à 90°).

3.2.5. Observation de sections transverses des FBG

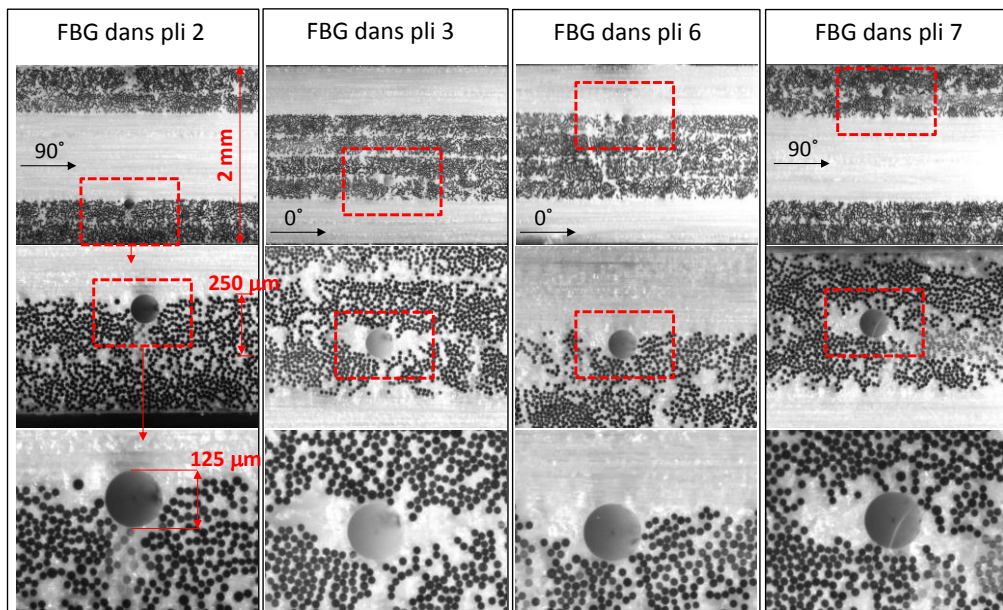


Fig.9. Micrographies de coupes transversales à trois échelles de grossissement des 4 FBG enfouis dans l'éprouvette avec instrumentation #1 après tests QSI.

Pour évaluer la perturbation potentielle des FBG sur le mécanisme d'endommagement, nous avons effectué des observations microscopiques de l'éprouvette à l'emplacement des capteurs. La Fig. 9 montre des micrographies obtenues à trois échelles de grossissement des quatre FBG enfouis dans l'éprouvette avec instrumentation #1. Premièrement, nous notons que les coupes longitudinales des plis faites pour insérer les fibres optiques sont complètement scellées après la fabrication. Il n'y a donc pas d'incidence mécanique due à la découpe des plis de pré-impregnés. Deuxièmement, tous les FBG ont migré verticalement vers le haut du pli dans lequel ils sont insérés. La position verticale réelle après fabrication doit être prise en compte pour la validation/comparaison du modèle. Troisièmement, nous notons une bonne cohésion/adhésion entre la matrice et le FBG, assurant un bon transfert de charge. Enfin, nous n'observons aucun délaminage ou fissure autour de la fibre. Cela signifie que lorsque les FBG sont positionnés conformément à notre stratégie d'instrumentation, ils ne peuvent être considérés comme initiateurs de dommages.

3.3. Impact basse vitesse (LVI)

3.3.1. Influence sur le comportement macroscopique

Les courbes force-déplacement des éprouvettes nues et instrumentées sous l'impact de 18 J sont présentées en Fig. 10a. Nous observons un comportement similaire. Cette remarque est également effectuée pour les éprouvettes #2 et #3. Là encore, les FBG enfouis ne semblent pas avoir d'influence sur le comportement macroscopique du stratifié GFPP soumis à LVI.

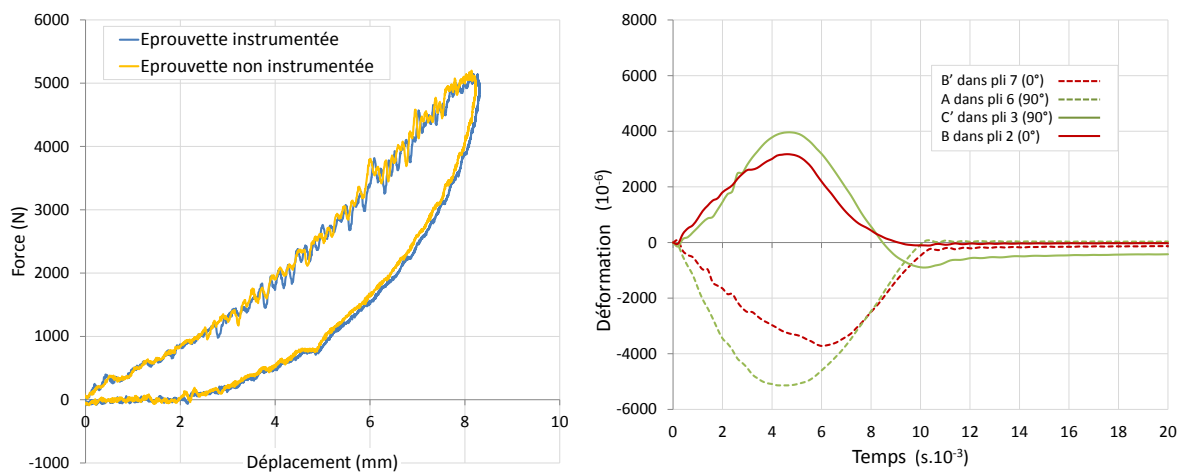


Fig.10. a) Courbes de charge en fonction du déplacement des éprouvettes nue et instrumentée #1 soumises aux essais LVI. b) Courbes des déformations mesurées à cœur en fonction du temps.

3.3.2. Influence des FBG sur l'endommagement

Les photos d'éprouvettes après test LVI (Fig. 7 droite) permettent d'observer les dommages occasionnés. La comparaison de la forme et de la taille du délaminage dans les éprouvettes instrumentées et nues révèle une étroite similitude. Par ailleurs, nous n'observons aucune croissance spécifique du dommage dans la direction des FBG enfouis. Pour ce niveau d'énergie d'impact, les FBG ne favorisent donc pas le délaminage ni l'initiation de fissures.

3.3.3. Réponse spectrale

Le balayage du niveau de puissance tous les 20 pm sur une largeur de bande de 80 nm implique l'analyse d'un ensemble de 16 000 points. D'un point de vue optique et technologique, il est très difficile d'obtenir de telles données en quelques millisecondes. À l'heure actuelle, il n'existe pas d'interrogateur optique commercial permettant cette performance. L'interrogateur que nous utilisons pour ce test a déjà une grande

capacité à détecter à 5 kHz le décalage de pic de Bragg pour quatre canaux (4 FBG). Il serait très exigeant d'avoir à la fois cette capacité et celle d'analyser la réponse du spectre de 4 FBG en même temps. Avec cette limite technologique, nous n'avons enregistré la réponse spectrale que juste avant le test et juste après. La *Fig. 11* montre les réponses des FBG de l'éprouvette avec instrumentation #1. Nous voyons que la forme des spectres initiaux est similaire à celle après le test. Aucune distorsion ou modification n'est détectée si ce n'est un léger décalage correspondant à des déformations résiduelles. Cependant, en raison de la limite du taux d'acquisition, les spectres représentant la déformation maximale n'ont pu être analysés. Ceci ne permet pas de valider en toute confiance les mesures de déformations au cours de l'impact.

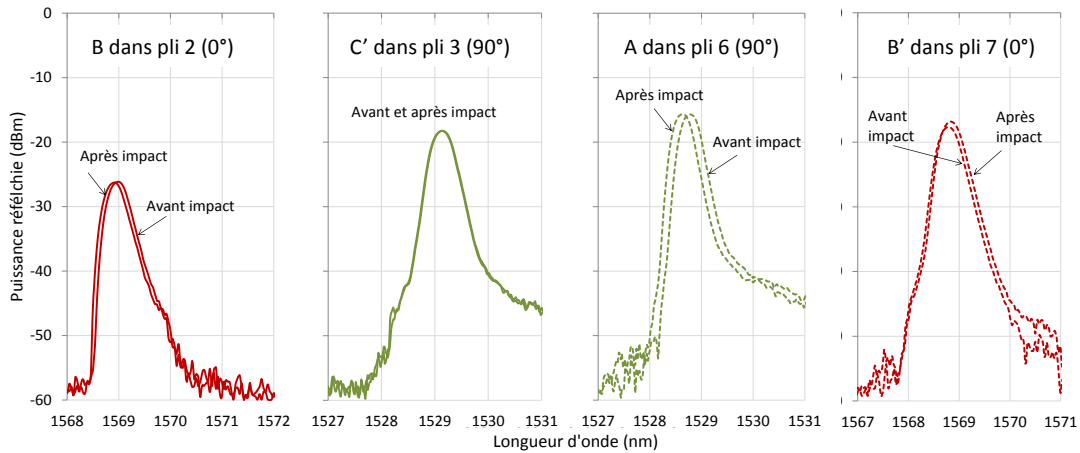


Fig. 11. Réponses spectrales en longueur d'onde de chaque FBG avant et après la phase d'impact pour l'éprouvette avec instrumentation #1

3.3.4. Suivi des déformations à cœur

L'interrogation à 5 kHz des pics de Bragg permet de couvrir l'événement d'impact, d'une durée approximative de 10 ms, avec un ensemble de 50 points de données pour chaque FBG. Les déformations en fonction du temps sont montrées *Fig. 10b*. Des réponses claires en tension et compression sont fournies. Les valeurs maximales de déformation semblent être légèrement décalées dans le temps d'un FBG à l'autre, en particulier pour le FBG en B'. Il est difficile de dire si cela est dû au comportement mécanique ou à une limite de la vitesse d'acquisition de l'interrogateur. La progression des déformations est légèrement accidentée, probablement à cause de ruptures de fibres ou de délaminages entre les plis lors du chargement. Cependant, un profil moyen peut raisonnablement être dégagé et permettre d'évaluer des taux de déformations. Une hystérésis est observée pendant le déchargement, ce qui indique que la perte d'intégrité structurelle due à des dommages au voisinage du capteur est détectée. Enfin, des déformations résiduelles sont induites après impact, confirmant cette même observation faite lors de l'analyse spectrale.

4. Conclusions

Nous avons étudié l'utilisation de FBG enfouis pour déterminer les déformations au cœur d'un composite thermoplastique (polypropylène homopolymère renforcé de fibre de verre unidirectionnelles) soumis à une indentation quasi-statique et à un impact faible vitesse. Nous avons effectué des mesures selon une stratégie d'instrumentation spécifique et démontré que dans la plupart des cas, nous obtenions un ensemble de déformations et de vitesses de déformation fiables. Les FBG enfouis constituent un outil efficace pour les mesures internes, mais le processus d'insertion, garantissant l'intégrité de la fibre optique lors de l'empilement des plis, de la fabrication par compression à chaud et du démoulage, reste un défi technologique. Le marquage des FBG permet une détermination précise de leur position et de leur orientation dans le plan après fabrication, ce qui est essentiel si une validation théorique est envisagée. L'observation au microscope de la section transversale du stratifié autour des FBG après essai a démontré une excellente cohésion et l'absence d'initiation de la fissure. La présence de FBG dans les stratifiés n'affecte pas le comportement macroscopique dans les conditions d'indentation QSI et d'impact LVI. Le processus QSI est suffisamment lent pour permettre un suivi de la réponse spectrale tout au long du test, tandis que le

processus LVI est trop rapide pour une procédure similaire. Dans ce cas la fiabilité de la mesure de la déformation au cours de l'essai ne peut être garantie.

Ces résultats de déformations à cœur permettront d'alimenter et de valider une simulation par éléments finis en cours de développement. Elle sera présentée prochainement dans une publication séparée. Nous espérons également que ce modèle prédictif aide à clarifier et à renforcer nos explications sur les lectures FBG.

Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans cette publication ont été financés par la Société SABIC sous le numéro d'accord de subvention RGC/3/2050-01-01 et par l'Université de Sciences et Technologies King Abdullah (KAUST) sous le numéro de subvention BAS/1/1315-01-01.

Références

- [1] Osborne J. Automotive Composites – in Touch with Lighter and More Flexible Solutions. *Met Finish* 2013;111:26–30.
- [2] Pulungan D, Lubineau G, Yudhanto A, Yaldiz R, Schijve W. Identifying design parameters controlling damage behaviors of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites using micromechanics as a virtual testing tool. *Int J Solids Struct* 2017; 117:177–190.
- [3] Yudhanto A, Lubineau G, Wafai H, Mulle M, Pulungan D, Yaldiz R, Verghese N. Monotonic and cyclic responses of impact polypropylene and continuous glass fiber-reinforced impact polypropylene composites at different strain rates. *Polym Test* 2016; 51:93–100.
- [4] Yudhanto A, Wafai H, Lubineau G, Yaldiz R, Goutham S, Verghese N, Mulle M. Revealing the effects of matrix behavior on low-velocity impact response of continuous fiber-reinforced thermoplastic laminates. Accepted for publication in *Composite Structures* (15.11.2018)
- [5] Alcock B, Cabrera N.O, Barkoula N.-M, Peijs T. Low velocity impact performance of recyclable all-polypropylene composites. *Compos Sci Technol* 2006; 66:1724–1737.
- [6] Du W, Tao XM, Tam HY, Choy CL. Fundamentals and applications of optical fiber Bragg grating sensors to textile structural composites. *Compos Struct* 1998;42:217–29.
- [7] Bosia F, Facchini M, Botsis J, Gmür T, De'Sena D. Through the thickness distribution of strains in laminated composite plates subjected to bending. *Compos Sci Technol* 2004; 64:71–82.
- [8] Mulle M, Zitoune R, Collombet F, Robert L, Grunevald YH. Embedded FBGs and 3-D DIC for the stress analysis of a structural specimen subjected to bending. *Compos Struct* 2009; 91:48–55.
- [9] Frieden J, Cugnoni J, Botsis J, Gmur T. Low energy impact damage monitoring of composites using dynamic strain signals from FBG sensors - Part I: Impact detection and localization. *Compos Struct* 2012; 94:438-445.
- [10] Shrestha P, Kim JH, Park Y, Kim CG. Impact localization on composite structure using FBG sensors and novel impact localization technique based on error outliers. *Compos Struct* 2016; 142:263-271.
- [11] Antonucci V, Esposito M, Ricciardi MR, Giordano M, Zarrelli M. Strain monitoring of composite elements by fibre Bragg grating sensors during a quasi-static indentation. *Compos: Part B* 2014; 56:34–41.
- [12] Takeda S, Minakuchi S, Okabe Y, Takeda N. Delamination monitoring of laminated composites subjected to low-velocity impact using small-diameter FBG sensors. *Compos Part A* 2005; 36:903-908.
- [13] Chambers AR, Mowlem MC, Dokos L. Evaluating impact damage in CFRP using fibre optic sensors. *Compos Sci Technol* 2007; 67:1235–1.
- [14] Salvetti M, Sbarufatti C, Gilioli A, Dziendzikowski M, Dragan K, Manes A, Giglio M. On the mechanical response of CFRP composite with embedded optical fibre when subjected to low velocity impact and CAI tests. *Compos Struct* 2017; 179:21–34.
- [15] Mulle M., Yudhanto A., Lubineau G., Yaldiz, Schijve W., Verghese N. Internal strain assessment using FBGs in a thermoplastic composite subjected to quasi-static indentation and low-velocity impact. *Compos Struct* 2019; 215:305–316
- [16] Mulle M, Wafai H, Yudhanto A, Lubineau G, Yaldiz R, Schijve W, Verghese N. Process monitoring of glass reinforced polypropylene laminates using fiber Bragg gratings. *Compos Sci Technol* 2016; 123:143-150.