



HAL
open science

Insertion d'une fibre optique dans une structure composite = Embedment of optical fibre into a composite structure

Benoît Delobelle, Frédéric Thiébaud, David Chapelle, Dominique Perreux,
Vincent Placet, Richard Ferrière

► **To cite this version:**

Benoît Delobelle, Frédéric Thiébaud, David Chapelle, Dominique Perreux, Vincent Placet, et al..
Insertion d'une fibre optique dans une structure composite = Embedment of optical fibre into a
composite structure. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00389137

HAL Id: hal-00389137

<https://hal.science/hal-00389137>

Submitted on 11 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.

Insertion d'une fibre optique dans une structure composite

Embedment of optical fibre into a composite structure

Benoît Delobelle^{1,2}, Frédéric Thiebaud¹, David Chapelle¹, Dominique Perreux¹, Vincent Placet¹,
Richard Ferrière²

1 : Institut Femto-ST / Département de mécanique appliquée
Université de Franche-Comté – F – 25000 BESANCON
e-mail : benoit.delobelle@univ-fcomte.fr, frederic.thiebaud@univ-fcomte.fr, david.chapelle@univ-fcomte.fr

2 : Institut Femto-ST / Département d'optique
Université de Franche-Comté – F – 25000 BESANCON
e-mail : richard.ferriere@univ-fcomte.fr

Résumé

Le but de cette étude est de déterminer quelle est le type de fibre optique le plus approprié pour une insertion dans une structure composite. En effet, il semble inutile de développer des capteurs à fibres optiques très sophistiqués, si l'effort subi par la structure n'est pas transmise au capteur. Tout d'abord, la mécanique de la rupture est utilisée pour évaluer les propriétés mécaniques des fibres optiques. Les fibres optiques monomodes et multimodes sont soumises à un test de traction uniaxial. Celle-ci se comporte comme un matériau fragile qui casse avant d'avoir subi une déformation plastique significative. Puis, une analyse de l'adhésion de la fibre optique avec une structure composite est présentée en s'appuyant sur un test de pull-out.

Abstract

The present study aims to determine the most suitable fibre which is to be used to be embedded in a composite structure. In fact, it is useless to develop some sophisticated sensors based on optical fibre if the applied load is not transmitted to the sensor. First, the failure mechanics is introduced to assess the mechanical properties of fibres (Young modulus and failure strength). Some tensile tests are performed on monomode and multimode optical fibres. These tests confirm the specimens are made of perfectly fragile materials, no relevant plastic deformation occurs. Then, the adhesive behaviour of the optical fibre embedded in the composite structure is studied using pull-out tests.

Mots Clés : Mécanique de la rupture, fibre optique, adhésion fibre/matrice

Keywords : Failure mechanics, optical fibre, fibre/matrix adhesion

1. Introduction

La résistance et le module spécifique élevé des matériaux composites combinés à leur excellente résistance à la corrosion et à la fatigue en font de très bons candidats pour les applications dans de nombreux secteurs industriels. Cependant, un facteur limitant est leur tendance à se fissurer dans un pli ou entre les plis rendant ainsi leur contrôle d'intégrité souvent nécessaire. Un tel contrôle requiert une caractérisation précise de l'initialisation des dommages. De nombreuses techniques destructives ou non existent déjà pour détecter et visualiser l'état de dommage interne. Dans notre cas, l'utilisation de capteur à fibre optique est retenue pour étudier l'endommagement et la déformation d'une structure composite. Les fibres optiques présentent le grand intérêt de pouvoir être directement intégrées dans la structure. L'étude porte donc sur le choix de la fibre optique en fonction de ses propriétés mécaniques.

Dans une première partie, la théorie de la mécanique de la rupture est introduite pour permettre de déterminer le comportement d'une fibre optique (en silice) lorsqu'elle est soumise à des sollicitations mécaniques. Celle-ci se comporte comme un matériau fragile qui casse avant d'avoir subi une déformation plastique significative. Pour caractériser cette contrainte à rupture, nous montrons que la statistique de Weibull est réaliste. Celle-ci repose sur une étude comportant un minimum de 20 échantillons. Pour observer le comportement mécanique de différentes fibres optiques (monomode, multimode) ainsi que l'influence du revêtement (acrylate, polyimide, ETFE), cinq types de fibre sont testés afin de déterminer leur résistance mécanique. Cela permet de déterminer si une fibre optique de 250 μm a les mêmes caractéristiques qu'une fibre de 140 μm qui présente l'avantage d'être moins intrusive au sein du composite.

La seconde partie de l'étude consiste à analyser l'adhésion d'une fibre avec une structure composite. En effet, pour pouvoir utiliser les fibres optiques en tant que capteur, il est indispensable que la contrainte appliquée à la structure se transmette à la fibre. Pour cela, nous utilisons une méthode de pull-out permettant de déterminer l'adhésion de la fibre à la matrice. Ainsi, différentes fibres sont insérées dans un volume de résine de désignation commerciale M10.

L'ensemble de cette étude permet d'apporter des éléments quantitatifs pour le choix d'une fibre optique et de son revêtement comme capteur pour une structure composite.

2. Mécanisme de rupture des fibres optiques

La rupture d'une fibre optique en silice – guide d'onde constitué d'un cœur dans lequel se propage l'onde lumineuse en se réfléchissant sur la gaine optique (ou cladding) - est un accident irréversible qui se produit lorsqu'une concentration de contrainte est générées autour d'un défaut de surface (contrainte est appliquée à un défaut à sa surface). Les défauts intrinsèques font références aux défauts de Griffith, conduisant seulement à la rupture pour des contraintes appliquées élevés. Un revêtement (ou coating) en polymère est appliqué à la surface du verre pour prévenir la formation de défauts à sa surface et pour réduire les concentrations de contrainte sur les défauts préexistants.

Une fibre optique peut être considérée comme un cylindre de verre ayant une très grande longueur avec une distribution donnée de défauts à sa surface. La fissure la plus sévère limite la résistance de la fibre. La résistance à la rupture du verre varie largement du fait des défauts de surface ou des micros fissures qui peuvent être inhérentes au verre. Ainsi, la théorie de Griffith sur les fractures fragiles permet de décrire la résistance du verre. Pour déterminer la résistance à la rupture d'une fibre, il est possible d'utiliser la statistique de Weibull. Pour cela, des essais quasi statiques de traction sont réalisés afin de mesurer la contrainte à rupture d'une fibre et pouvoir conduire un traitement statistique.

2.1. Propriétés mécaniques.

La fragilité du verre est bien connue. C'est une propriété facile à constater mais plus difficile à définir de manière quantitative. Sous l'action d'une contrainte de traction, le verre se déforme élastiquement jusqu'à la rupture. La fracture s'initie dans une direction approximativement perpendiculaire à la direction de contrainte maximale. La rupture survient brutalement sans qu'aucune déformation plastique ne soit décelée. Pour de faibles contraintes appliquées, la loi de Hooke est vérifiée (eq. 1); la déformation est proportionnelle à la contrainte.

$$\sigma = E_0 \cdot \varepsilon = E_0 \cdot \frac{\Delta \ell}{\ell} \quad (\text{eq. 1})$$

où E_0 représente le module d'Young de la silice (~73 GPa), σ la contrainte, ε l'allongement relatif de l'échantillon ou déformation, ℓ la longueur de l'échantillon et $\Delta \ell$ l'allongement de l'échantillon. Pour le verre de SiO_2 , la résistance cohésive théorique [1, 2] est estimée à environ 20 GPa. Mais expérimentalement, une valeur aussi élevée n'a jamais été observé. En effet, aujourd'hui les fibres standards présentent une résistance mécanique de l'ordre de 5 à 6 GPa dans des conditions normales d'utilisation. Griffith suggère que les fissures agissent comme un amplificateur de contrainte et cause la rupture. Irwin a démontré qu'il existait une équation (eq. 2) reliant le facteur d'intensité de contrainte K_I et la contrainte appliquée σ à la longueur de la fibre.

$$K_I = \sigma \cdot Y \cdot \sqrt{a} \quad (\text{eq. 2})$$

Dans cette équation Y est le paramètre de forme géométrique de la fissure qui est constant pour une géométrie de défaut donnée, σ est la contrainte appliquée et a la profondeur de la fissure. Par exemple, dans le cas d'une fissure elliptique soumise à une contrainte de traction, on a $Y=1,24$. C'est cette valeur de Y qui est généralement utilisée pour les fibres optiques. Lorsque K_I excède l'effort critique du matériau K_{IC} , une fissure peut se propager rapidement ce qui conduit à la rupture. Pour la silice, le facteur critique K_{IC} est considéré comme constant et prend une valeur de $K_{IC}=0,789 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. La contrainte σ_f est alors définie comme étant l'effort pour lequel se produit la fracture.

$$\sigma_f = \frac{K_{IC}}{Y \cdot \sqrt{a}} \quad (\text{eq. 3})$$

K_I est le facteur d'intensité de contrainte qui relie la taille de la fissure à la contrainte. Lorsque a et σ sont tels que $K_I = K_{IC}$ alors il y a rupture brutale du matériau. Nous avons donc une relation entre la taille de la fissure critique provoquant la rupture et la contrainte de rupture. En utilisant cette expression, on peut déterminer que le verre de silice contient des fissures de profondeur maximale de 16 nm qui conduisent à une rupture pour une contrainte de 5 GPa.

2.2. Probabilité de rupture

L'étude d'un matériau fragile montre une grande dispersion. Pour cette raison, il est nécessaire d'utiliser une méthode statistique, notamment celle de Weibull. Lorsqu'il n'y a qu'une seule famille de défauts, le diagramme représentatif de la probabilité de rupture est une droite dont la pente positive m est d'autant plus forte que la distribution de la taille des défauts est plus resserrée. La manière la plus commune pour déterminer expérimentalement la résistance des fibres est d'effectuer un test de traction. Dans ce test, une longueur de fibre est étirée jusqu'à ce qu'elle se rompe. La probabilité pour qu'une fibre de longueur L casse sous une contrainte inférieure ou égale à σ est une fonction croissante de L et σ . Pour expliquer la rupture des matériaux fragiles, comme le verre et en particulier les fibres optiques, on utilise en général la théorie du maillon le plus faible : la fibre est considérée comme la juxtaposition d'éléments parfaitement indépendants du point de vue de la rupture et c'est l'élément le plus faible qui entraîne la rupture du solide tout entier. Ainsi, la probabilité de rupture d'une fibre de longueur L soumise à une contrainte σ s'écrit :

$$F(\sigma, L) = 1 - \exp(-LN(\sigma)) \quad (\text{eq. 4})$$

La loi statistique qui semble la plus adaptée à l'étude de la résistance mécanique des fibres optiques est dite de Weibull, à savoir lorsque le nombre cumulatif de défauts $N(\sigma)$ est de la forme :

$$N(\sigma) = \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \quad (\text{eq. 5})$$

Généralement, on pose $\sigma_u=0$, car la loi de Weibull sous cette forme constitue pour les fibres optiques un excellent modèle pour la distribution des résistances. Ainsi la probabilité de rupture $F(\sigma, L)$ d'une fibre de longueur L peut s'écrire :

$$F(\sigma, L) = 1 - \exp\left(-L\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right) \quad (\text{eq. 6})$$

En écrivant l'équation 6 sous forme logarithmique, on obtient l'expression suivante :

$$\text{Ln}\left[\frac{1}{L}\left[\text{Ln}\left(\frac{1}{1-F}\right)\right]\right] = m(\text{Ln}\sigma - \text{Ln}\sigma_0) \quad (\text{eq. 7})$$

La représentation graphique de l'équation 7 est appelée diagramme de Weibull. Ce diagramme permet de déterminer les paramètres m et σ_0 , qui correspondent respectivement à la pente de la courbe et à l'intersection de la courbe avec l'axe des contraintes. Le paramètre m caractérise la dispersion de la taille des défauts. Une valeur élevée du paramètre m indique que les défauts le long de la fibre ont une taille relativement similaire. Une faible valeur de m révèle que les défauts présents à la surface de la fibre ont des dimensions très diverses et donc entraînent la rupture pour des valeurs de contraintes très différentes. Quant au paramètre σ_0 , il représente la contrainte pour laquelle la probabilité cumulée de rupture F de la fibre est égale à 63%. Le diagramme de Weibull peut être représenté suivant deux manières (Fig. 1).

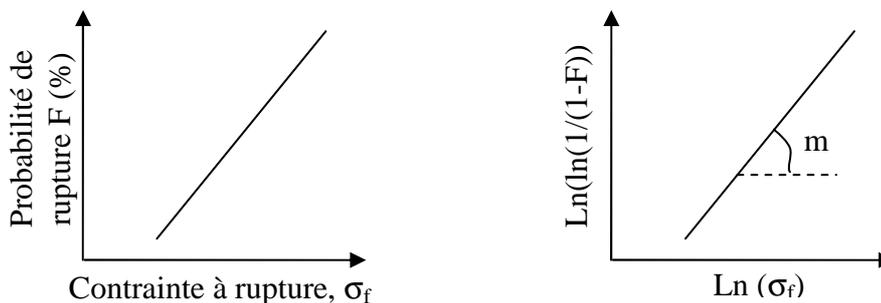


Fig. 1. Représentation du diagramme de Weibull

Pour tracer le diagramme de Weibull correspondant à une fibre, on teste mécaniquement un grand nombre d'échantillons (en pratique, une vingtaine d'échantillons sont testés). Tous les échantillons ont la même longueur L . Une fois les essais effectués, on classe par ordre croissant les contraintes de rupture obtenues.

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \dots \leq \sigma_i \leq \sigma_{i+1} \leq \dots \leq \sigma_N \quad (\text{N étant le nombre total d'échantillons testés})$$

A chaque contrainte de rupture σ_i est affectée une probabilité de rupture $F(\sigma_i, L)$. Plusieurs fonctions de probabilité existent. La formulation la plus simple pour un nombre d'échantillons supérieur à 20, est donnée par la relation :

$$F(\sigma_i, L) = \frac{i - 0,5}{N} \quad (\text{eq. 8})$$

Nous retenons cette fonction de probabilité pour tracer le diagramme de Weibull et déterminer les paramètres m et σ_0 .

2.3. Test de traction uniaxial des fibres optiques

Un essai quasi statique consiste à soumettre la fibre à une contrainte croissante à vitesse constante. La contrainte à rupture de la fibre est alors mesurée. Dans la norme internationale CEI, deux grands types d'essais sont définis : le test de traction sous tension axiale et le test de traction sous flexion deux points. D'après Chen & Chang [3], la résistance des fibres optiques testées avec les deux méthodes donnent des résultats similaires. Dans leur cas, la contrainte à rupture à 50% pour le test de traction uniaxial est estimée à 4,5 GPa et par la méthode de flexion deux points à 5,1 GPa. Les données de ces différentes méthodes sont compatibles avec la statistique de Weibull. Un défaut critique à la surface du verre a été trouvé comme pouvant être à l'origine de la rupture et sa taille est estimée à quelques nanomètres.

Présentement, pour déterminer les propriétés mécaniques des fibres optiques, nous avons recours à des essais de traction uniaxiaux. De conception simple, la technique la plus commune est le test de traction uniaxiale qui consiste à tirer les extrémités de la fibre selon son axe [4, 5, 6]. Le principal inconvénient de cette technique réside dans la méthode d'accrochage de la fibre. La technique la plus fiable et la plus largement utilisée est d'enrouler les deux extrémités de la fibre en effectuant deux ou trois tours autour d'une poulie fixe et une mobile. Les poulies sont recouvertes d'un film de caoutchouc qui permet de lisser les discontinuités de l'effort ainsi que d'effectuer graduellement le transfert d'effort à la fibre.

Pour réaliser les essais quasi-statiques traditionnels, une machine de traction électrique (Electroforce 3200) est utilisée. Celle-ci permet d'appliquer aux fibres des forces s'étendant de quelques mN jusqu'à 450 N. Les mesures de force et de déplacement sont assurées respectivement par deux cellules de force, d'une capacité de +/- 450 N et +/- 22 N, et par deux LVDT dotés d'une plage de mesure de +/- 6,25 mm et +/- 2,5 mm. La force et l'allongement à laquelle se produit la rupture de la fibre ont pu être mesurés. La force est donc déterminée précisément à l'aide d'une cellule dynamométrique alors que l'allongement est déduit du déplacement effectué par la traverse supérieure. Connaissant cette force et les dimensions de la fibre, il est possible d'en déduire la contrainte maximale et ainsi d'évaluer le module d'Young de la fibre optique avec son revêtement.

Lors de ce test, la longueur de fibre testée est d'environ 30 mm. Cette fibre est étirée à une vitesse constante de 0,02 mm/s jusqu'à sa rupture. Le niveau de force pour lequel la fibre casse est enregistré. Pour un minimum de 20 ruptures, la distribution de la résistance des fibres est représentée selon la statistique de Weibull (eq. 7). Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 2.

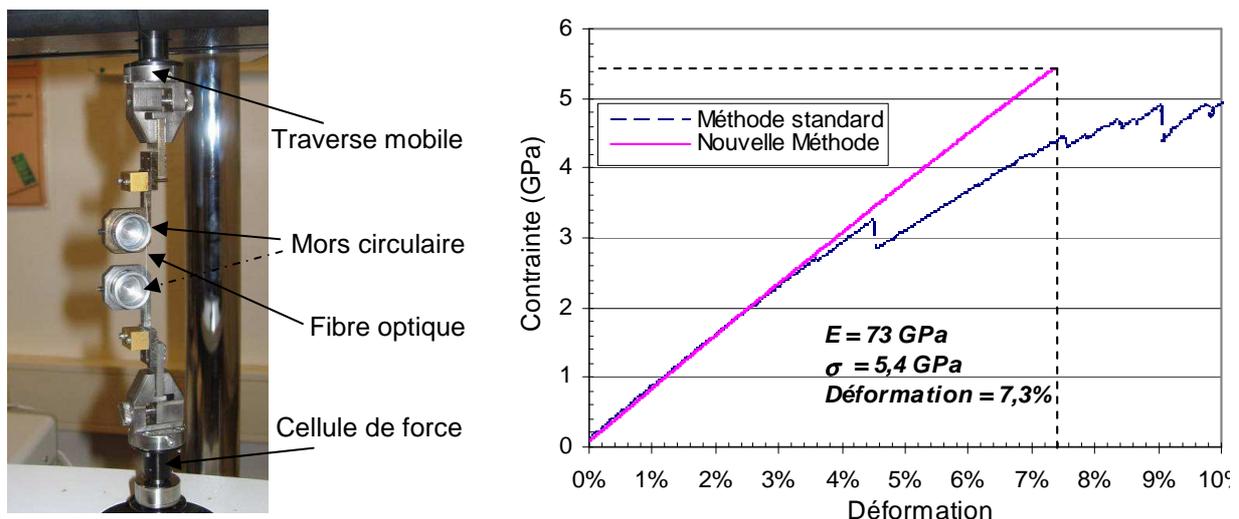


Fig. 2. Machine de traction et résultat d'un essai de traction

Parmi les différentes méthodes de fixation des fibres optiques telles que le collage ou l'enroulement de la fibre autour d'un mors, peu de méthode en l'état donnent des résultats satisfaisant pour une longueur utile faible (environ 30 mm). En effet, lorsque nous utilisons ces méthodes, il apparaît un glissement de quelques millimètres ce qui provoque des chocs sur la fibre qui peuvent amorcer certains défauts. Ces chocs fragilisent la fibre et la rupture survient alors prématurément. C'est pourquoi, il est nécessaire d'utiliser une méthode fiable permettant de caractériser de manière reproductible la rupture propre de la fibre. De

nombreuses méthodes ont été testées mais peu donnent le résultat escompté, soit du fait de glissements trop nombreux, soit du fait de la rupture prématurée dans les mors.

La solution retenue pour effectuer ces tests sur un échantillon de fibre optique de faible longueur, est une synthèse de plusieurs méthodes. En effet, l'extrémité de la fibre est maintenue mécaniquement entre des caoutchoucs afin que l'appui mécanique ne la fragilise pas. Puis celle-ci est enroulée autour d'un mors circulaire et enfin collée. Une attention particulière doit être accordée à la colle qui lorsqu'elle est appliquée trop longtemps endommage le revêtement de la fibre. Suivant les revêtements, la colle peut favoriser la décohésion entre le revêtement et la silice. Cette méthode donne des résultats satisfaisant avec laquelle les glissements sont quasi inexistantes. En effet, aucun glissement brutal de la fibre n'est observé et la déformation est parfaitement linéaire (Fig. 2). Cela signifie qu'il n'y a pas de déformation plastique et que seule la déformation élastique intervient. La rupture survient de manière brutale, ce qui est caractéristique d'un matériau fragile.

En connaissant la force à laquelle s'est produite la rupture, ainsi que le diamètre de la fibre et sa longueur, les caractéristiques mécaniques sont déterminées. Le module d'Young mesuré à partir de la force à rupture avoisine les 73 GPa, ce qui correspond au module d'Young théorique de la silice. Comme il l'a été pressenti précédemment, le revêtement ne joue donc aucun rôle déterminant sur les propriétés mécaniques d'une fibre. Cela provient du fait que le revêtement a un faible module d'Young (quelques GPa) et qu'il se déforme aisément. Lors de ce test, la contrainte à rupture se situe aux alentours de 5,4 GPa pour une déformation maximale de 7,3%.

Pour observer le comportement mécanique des différentes fibres ainsi que l'influence du revêtement, cinq types de fibres ont été testés permettant ainsi de déterminer leurs résistances mécaniques. Cela permet également d'évaluer si une fibre optique de 250 μm a les mêmes caractéristiques qu'une fibre de 140 μm et qui présente l'avantage d'être moins intrusive au sein du composite. Le tableau 1 récapitule les caractéristiques morphologiques des cinq fibres testées à l'aide du montage présenté en figure 2.

Fibre optique (désignation commerciale)	Nature de la fibre	Diamètre cœur (μm)	Diamètre gaine (μm)	Diamètre revêtement (μm)	Nature du revêtement
SMF28e	monomode	8	125	250	acrylate
SMT-A1310H	monomode	5,8	125	155	polyimide
TCG-MA100H	multimode	100	110	140	polyimide
TCG-MA200H	multimode	200	220	250	polyimide
HCP-M0125T	multimode	125	140	250	ETFE

Tab 1. Tableau récapitulatif des morphologies des différentes fibres optiques testées

La première fibre est une fibre standard de télécommunication SMF28e optimisée pour les réseaux informatiques. Il s'agit d'une fibre monomode ayant un cœur de 9 μm et une gaine optique de 125 μm avec un revêtement en acrylate d'une épaisseur de 62,5 μm , soit un diamètre total de 250 μm . La seconde fibre est également monomode et destinée aux télécommunications, d'où son diamètre de gaine normalisé à 125 μm , mais possède un revêtement en polyimide permettant d'être intégrée dans un certain nombre d'environnement spécifiques. Deux fibres silice/silice, multimode, à saut d'indice sont également testées. Ces fibres sont constituées d'un cœur de silice pure (high OH), d'une gaine de silice dopée et d'un revêtement extérieur de polyimide. Seules leurs dimensions diffèrent. L'une a un cœur de 100 μm , une gaine de 110 μm pour un diamètre extérieur de 140 μm avec un revêtement en polyimide. L'autre a un cœur de 200 μm , une gaine de 220 μm pour un diamètre extérieur de 250 μm avec un revêtement de polyimide. La cinquième fibre est une fibre multimode à saut d'indice ayant cette fois-ci un cœur de silice pur (low OH), une gaine en polymère dur et d'une gaine extérieure d'ETFE qui est un thermoplastique fluoré. Le cœur a un diamètre de 125 μm , la gaine mesure 140 μm et le diamètre total comprenant le revêtement mesure 250 μm . En testant cette fibre, nous montrons que seul le diamètre du cœur qui est en silice intervient dans la résistance mécanique de cette fibre.

Tout comme Chen & Chan [3], nous observons que les fibres optiques monomode et multimode ayant un revêtement acrylate ou polyimide lors d'un test de traction ont des comportements très similaires. Toutefois, en comparant les résultats de la figure 3, il est possible de remarquer qu'une fibre ayant un revêtement acrylate a une résistance mécanique (5,4GPa) légèrement supérieure à celle d'une fibre polyimide (5,3GPa). De part son facteur de fatigue plus élevé, la fibre polyimide vieillit cependant mieux qu'une fibre acrylate. Il est également possible d'observer que la fibre silice-polymère-ETFE est moins résistante que les autres fibres. En effet, lors des essais avec cette fibre, nous avons pu observer une mauvaise cohésion du revêtement ETFE avec la gaine optique en polymère. Dans ce cas, il y a un mauvais transfert d'effort entre les différents constituants de la fibre. La contrainte appliquée sur le revêtement n'est par conséquent pas la même que celle appliquée à la silice. Dans le cas où le choix de cette fibre serait retenue pour être inséré au sein d'un composite, il serait donc difficile d'obtenir l'état de contrainte. En effet, l'effort appliqué par les fibres de carbone serait transféré au revêtement mais celui-ci n'étant pas solidaire en

tout point avec la silice, il y aurait un mauvais transfert d'effort. Il est également possible d'observer (MEB) un phénomène de pull out entre la fibre optique et le revêtement lors d'un test de traction uniaxial. Cela est dû au fait que le polymère est beaucoup plus ductile que le verre. Lors d'un test de traction, la fibre subit donc plus de contrainte que la gaine, ce qui aboutit donc à cette décohésion. Ceci est d'autant plus vérifié avec un revêtement acrylate qu'avec un revêtement en polyimide, que ce dernier possède un module d'Young supérieur à celui de l'acrylate.

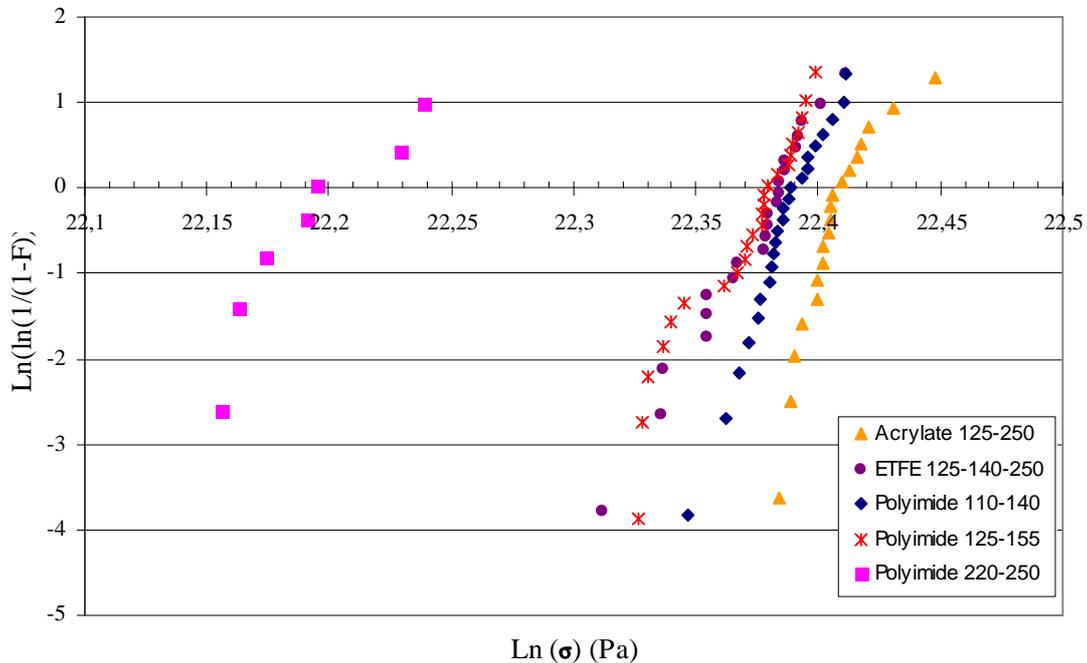


Fig. 3. Courbes de probabilité de rupture obtenue pour différentes fibres

Quant à la fibre ayant un diamètre de silice plus important (220 μm), il semble normal que la contrainte soit plus faible car pour une même longueur de fibre le volume est plus important, ce qui laisse supposer que la probabilité de présence d'un défaut est plus importante. Il faut toutefois faire très attention à l'exploitation de ce résultat, car cette fibre a un diamètre plus gros que les autres ce qui impose un rayon de courbure plus important qu'il faut respecter. En utilisant notre montage, il est probable que l'on ajoute des contraintes par courbure de la fibre, ce qui amorce certains défauts.

A partir de la figure 3, en linéarisant les représentations, nous obtenons un module de Weibull m compris entre 50 et 70 (Tab. 2), ce qui est plus élevé que pour des fibres de verre où m vaut 30. Diverses interprétations de cette valeur ont été proposées [7]. Après examen de la surface, il a notamment été suggéré que les variations apparentes de la résistance mécanique n'étaient peut être dues qu'aux incertitudes sur les diamètres et que les résistances mécaniques réelles des fibres soient toutes identiques.

Fibre optique	Nature du revêtement (diamètre silice)	Probabilité de rupture à 63% (GPa) ou σ_0	Module de Weibull m
SMF28e	Acrylate (125 μm)	5,4	73,89
SMT-A1310H	Polyimide (125 μm)	5,2	52,62
TCG-MA100H	Polyimide (110 μm)	5,3	79,84
TCG-MA200H	Polyimide (220 μm)	4,4	35,36
HCP-M0125T	ETFE (125 μm)	5,25	52,07

Tab. 2. Caractéristiques mécaniques de différentes fibres optiques

3. Adhérence fibre optique-composite : Méthode de pull out

3.1. Introduction

L'utilisation de plus en plus fréquente des capteurs à fibres optiques est le résultat de l'augmentation des applications comme par exemple l'implantation de fibre optique dans des matériaux composites pour la détection des dommages. Idéalement ces capteurs ne doivent pas dégrader les performances du matériau composite. Cependant, il y a une grande disparité entre le diamètre de la fibre optique (~100 à 300 μm) et le diamètre des fibres de carbone (~7 à 14 μm). Pour s'affranchir de cet effet, qui est au détriment des propriétés mécaniques du composite, deux solutions existent. Il est possible soit d'utiliser des fibres

renforcées pour produire un capteur optique, soit d'utiliser des revêtements alternatif pour diminuer l'épaisseur. Toutefois, il semble inévitable d'observer une dégradation des performances entre la fibre optique et le composite à l'endroit où les contraintes se concentrent autour de la fibre. Glossop & al [8] ont montré que dans un composite uniaxial, la force axiale de la structure n'était pas affectée par la présence d'une fibre.

Il est bien connu [9] que l'adhésion de l'interface fibre-matrice influence fortement les propriétés mécaniques du composite. Les performances mécaniques du composite dépendent du transfert de charge de la matrice à la fibre par un cisaillement au niveau de l'interface. Il semble important d'avoir une bonne adhésion entre la matrice et la fibre. De plus, il apparaît nécessaire d'avoir un lien suffisant entre la fibre optique et le matériau l'entourant et qu'une faible épaisseur de revêtement est préférable. Une des questions à laquelle il n'y a pas de réponse est de savoir si un changement de diamètre de fibre peut affecter la force de cisaillement à l'interface.

3.2. Méthode pour déterminer la force d'adhésion de l'interface

Il existe différentes méthodes pour quantifier l'interface entre une fibre optique et la résine tels que les méthodes traditionnelles de pull-out, la fragmentation ou la microindentation. Dans notre cas, la méthode de pull-out est utilisée. Celle-ci présente l'avantage d'être une mesure directe, mais demande cependant de porter une attention très particulière dans la préparation des échantillons (formation de ménisque).

Lors d'un essai de pull-out, la courbe de chargement en fonction du déplacement comprend trois phases caractéristiques (Fig. 4). La première phase correspond à un chargement élastique jusqu'à ce que la liaison entre la fibre et la résine se rompe. La seconde phase correspond à la propagation de la rupture d'adhésion qui est suivi par le glissement de la fibre dans l'échantillon. Nous verrons par la suite que ce résultat attendu n'est pas toujours vérifié.

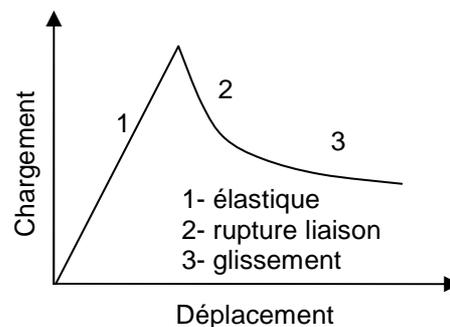


Fig. 4. Courbe typique lors d'un essai de pull-out

Les essais de pull-out sont réalisés sur la même machine que celle présentée précédemment et pour les mêmes fibres optiques (Tab. 1). Des problèmes de glissement sont également présents ; il est toujours difficile de maintenir sans glissement la fibre dans les mors. Dans ce test qui consiste à atteindre la force pour laquelle la fibre optique n'adhère plus à la résine, nous tirons la fibre optique jusqu'à ce qu'elle se désolidarise de son socle en résine. La fibre est enroulée autour d'un mors circulaire et maintenue mécaniquement par un quart de cercle caoutchouté (Fig. 5). Cette méthode d'enroulement présente quelques glissements qui ne rentrent pas en compte du fait que seule la force d'adhésion nous intéresse.

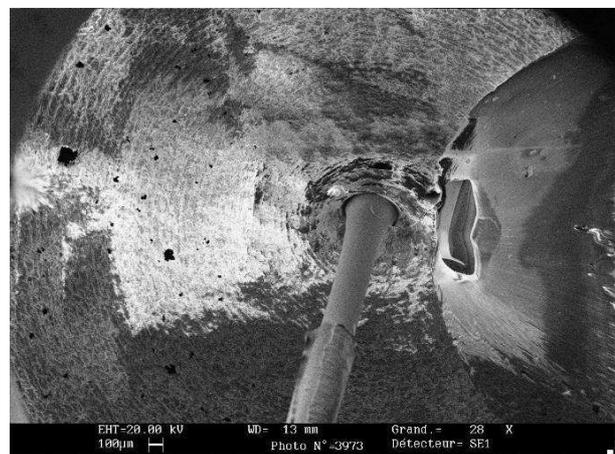
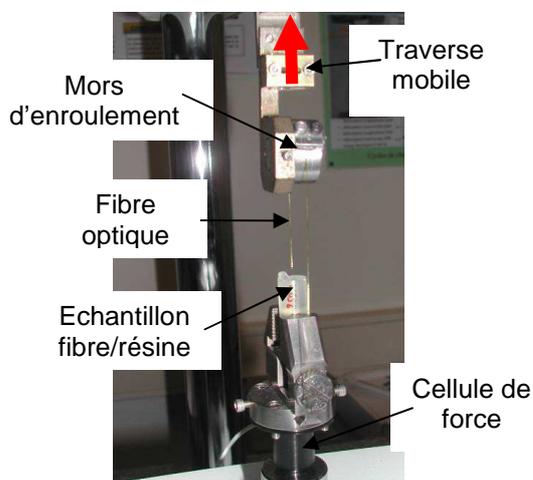


Fig. 5. Photo d'un test de pull-out et image MEB d'un échantillon polyimide après test

3.3. Préparation de l'échantillon

Pour pallier les différents problèmes que représente la préparation d'un échantillon lors d'un essai de pull-out, nous réalisons un moule en Téflon qui permet un démoulage plus aisé. Zolfaghar [10] qui réalise le même type d'étude utilise des moules en caoutchouc siliconé. Le moule comprend 3 parties : un couvercle inférieur et un couvercle supérieur ainsi qu'un tube creux qui constitue le corps principal (Fig. 6). Les deux couvercles sont percés en leur centre d'un diamètre légèrement supérieur à celui de la fibre optique. Cela permet d'avoir une fibre optique parfaitement centrée par rapport à la résine. Le couvercle supérieur présente également une seconde ouverture. Cette ouverture joue un double rôle, à la fois pour le remplissage du moule en résine, mais également de réservoir à résine. En effet, en utilisant de simple moule ouvert, lorsque la résine polymérise, celle-ci se rétracte et forme un ménisque. En utilisant la réserve de résine présente dans le couvercle supérieur, ce ménisque est comblé par l'apport de résine comprise dans l'ouverture réalisée à cet effet. Tous les échantillons sont réalisés de la même manière, c'est-à-dire en plaçant la fibre optique centrée dans les couvercles. Les moules sont tous identiques. La longueur d'enrobage est de 20 mm. Le fait que la fibre optique traverse toute la résine et que l'on n'ait pas la présence de ménisque assure d'avoir des échantillons présentant la même longueur d'enrobage.

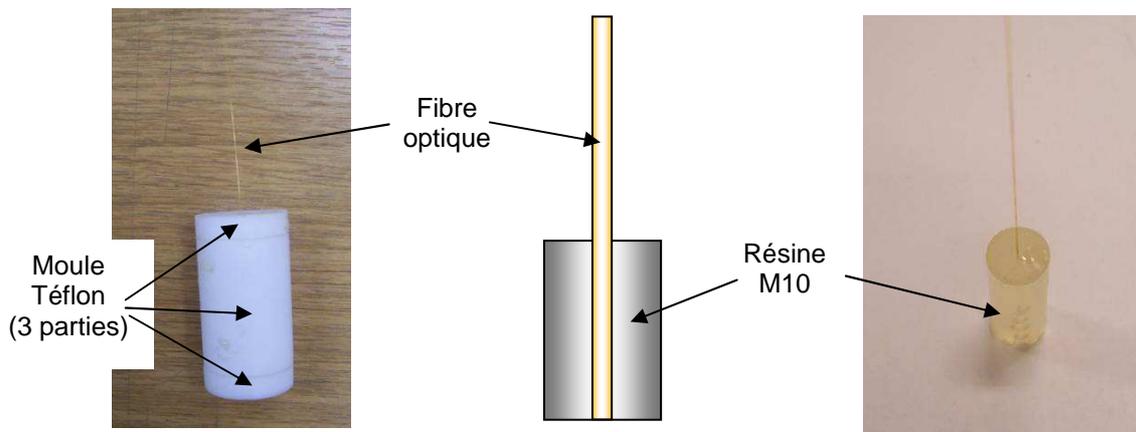


Fig. 6. Réalisation des échantillons

Lorsque les fibres sont placées dans leur moule, le remplissage est effectué par de la résine M10. Cette résine correspond à une résine époxy utilisée avec des fibres de carbone pour la réalisation de réservoir composite. Les moules remplis de résine sont ensuite placés dans un four à 150°C pendant 1h30min. Cela permet à la résine de polymériser. Puis, vient l'opération la plus délicate pour la fibre optique, qui est le démoulage. Le couvercle inférieur est tout d'abord retiré. L'excès de fibre optique à son extrémité inférieure est coupé. Il faut ensuite faire coulisser la fibre optique à travers le couvercle supérieur sans la casser. Il ne reste à présent plus qu'à pousser la matrice résine/fibre de sa partie centrale pour avoir un échantillon prêt à être testé.

3.4. Résultats expérimentaux

Nous effectuons ces tests de pull-out afin de déterminer quelle est la nature de la fibre qui permet le meilleur transfert de charge entre une structure composite et la fibre. Les fibres testées sont toutes différentes soit de part leur diamètre, soit de part la nature du revêtement (Tab. 1). Malheureusement, seul un faible nombre d'échantillons a pu être testé.

En effectuant ce test sur des fibres optiques standards destinées aux télécommunications (fibre SMF28e) avec un revêtement en acrylate, nous observons (Fig. 7) le même phénomène que décrit précédemment (Fig. 4), c'est-à-dire, une partie élastique où la force entre la fibre et la résine est transmise, puis une désolidarisation de la liaison fibre avec la résine et enfin le glissement continu de la fibre dans la résine. Dès que la fibre est désolidarisée de la résine, le transfert d'effort entre la fibre et la résine n'est plus présent. Lors de ces tests, nous observons que la force maximale que peut subir la fibre optique avant décohésion est voisine de 16N soit 1,3GPa, ce qui représente une déformation d'environ 1,8%. Cette valeur n'est qu'une valeur maximale, car d'un échantillon à l'autre la force de décohésion varie largement entre 6N et 16N. L'adhésion ne semble pas suffisante pour transmettre de façon convenable l'effort subi par la structure à la fibre optique.

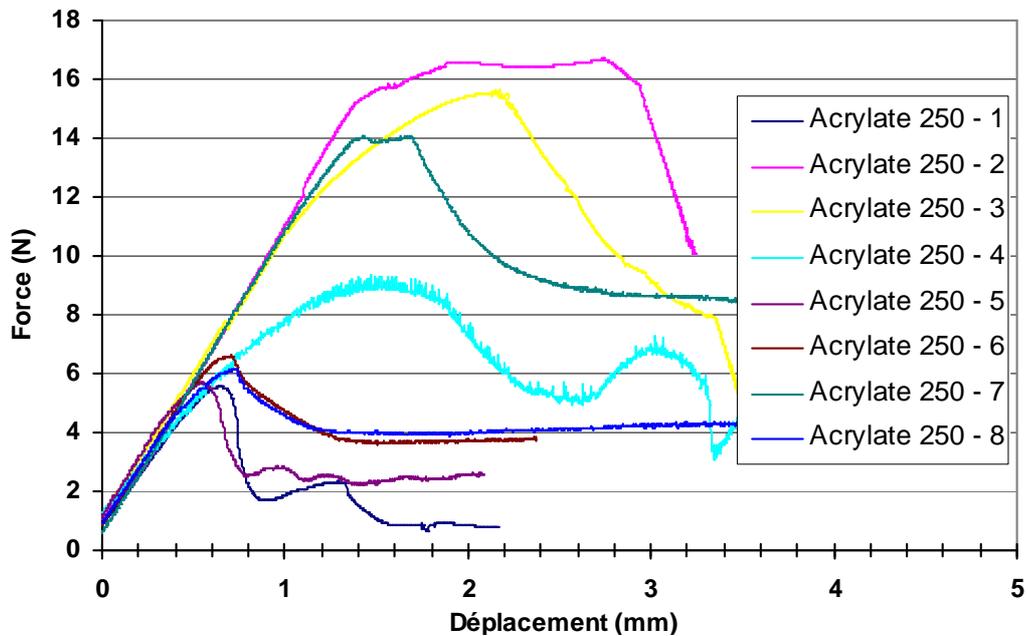


Fig. 7. Courbes d'un test de pull-out pour des fibres optique acrylate

Nous effectuons ce même type de test pour des fibres avec un revêtement ETFE. Le résultat obtenu est loin d'être plus convainquant car la fibre glisse dans la résine dès qu'on lui applique une légère force. La force de décohésion est comprise entre 2N et 3N. Cette fibre est complètement inadaptée pour une utilisation dans un composite.

Nous testons ensuite des fibres optiques avec un revêtement polyimide qui d'après la littérature semble plus adaptée pour transmettre l'effort vers la résine du fait d'un module d'Young plus élevé. Différentes fibres sont testées avec des diamètres différents (140 μ m, 155 μ m, 250 μ m) pour déterminer si l'influence du diamètre est un paramètre important. Pour toutes les fibres utilisées, nous n'avons jamais été capables de désolidariser totalement la fibre de la résine. Des glissements apparaissent à partir de 30N (Fig. 8) ce qui était à prévoir, mais ceux-ci proviennent d'un léger glissement de la fibre avec le mors circulaire. Même après glissement, il est possible d'observer que la force appliquée à la fibre est transmise à la résine. Cela laisse supposer que lorsqu'une fibre avec un revêtement polyimide est introduite dans la résine M10, le transfert d'effort est bien réalisé. Après avoir observé les échantillons au MEB, nous pouvons cependant observer que quelques échantillons présentent un revêtement cassé à l'interface fibre/résine (Fig. 5). Cela semble ne pas être préjudiciable, tant que la longueur dénudée de la fibre n'est pas trop grande. Quand au diamètre des fibres optiques, si l'on se reporte aux contraintes subies, il ne semble pas jouer un rôle essentiel sur l'adhésion.

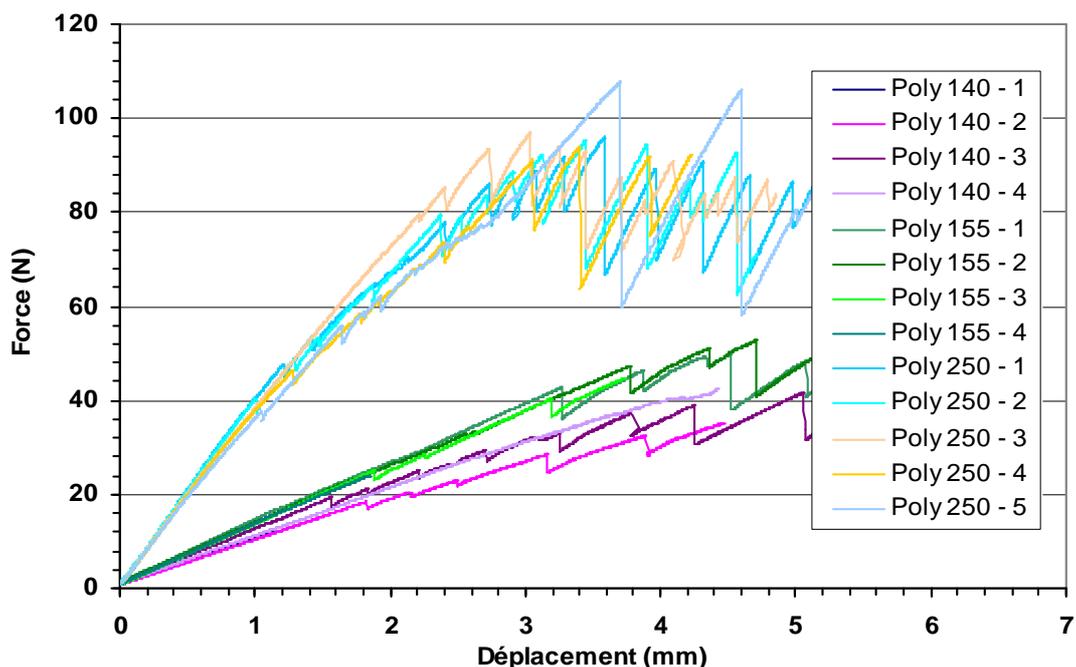


Fig. 8. Courbes d'un test de pull-out pour des fibres optique polyimide

4. Conclusion

Les tests de résistances mécaniques des fibres optiques ne permettent pas de déterminer précisément le type de fibre optique à utiliser en vue d'insérer une fibre optique dans un composite. En effet, les contraintes à rupture des différentes fibres sont toutes très proches les unes des autres (entre 5,25GPa et 5,4GPa), ce qui ne représente pas un critère suffisant pour choisir une fibre.

Les tests de pull-out ont donc permis de déterminer plus précisément quelles fibres sont les plus adaptées. Il est reconnu [11] que pour une efficacité maximale de la fibre optique, il fallait un bon transfert de la matrice à la fibre optique. Les premières observations avec une fibre acrylate montrent l'existence de fissure à l'interface revêtement-résine, ce qui indique une mauvaise adhésion entre les constituants. Cela se traduit donc par une réponse inadéquate du capteur. Nous constatons que l'utilisation d'une fibre avec un revêtement polyimide permet un meilleur transfert d'effort entre la structure composite et la fibre optique. De plus, l'utilisation du polyimide est hautement recommandée car la polymérisation de la résine s'effectue à une température supérieure à 120°C, température à laquelle l'acrylate peut se détériorer. L'effet du revêtement et de l'épaisseur suggère qu'un revêtement dur et fin offre de meilleures performances. Un revêtement ayant un module élastique élevé offre un couplage suffisant. Si le revêtement est souple, celui-ci peut absorber partiellement l'effort et ainsi ne transmet que partiellement l'effort au capteur. Quant au diamètre, afin de créer le moins de perturbation possible à la structure composite, suivant l'utilisation du capteur (utilisation d'une fibre optique monomode ou multimode), il semble préférable d'utiliser les fibres optiques avec un diamètre réduit de 140µm ou 155µm.

Remerciements

Le travail présenté dans ce papier a été réalisé grâce à la participation du Conseil Régional de Franche-Comté et de la société Hexcel Composites.

Références

- [1] J. Barton, C. Guillemet, « Le Verre, Science et Technologie », *Livre Edition EDP Sciences*
- [2] J. Phalippou, « Verres- Propriétés et Applications », *Techniques de l'Ingénieur*, AF 3601
- [3] C.P. Chen, T.H. Chang, « Fracture mechanics evaluation of optical fibers ». *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 77, pp.110-116, 2002.
- [4] D. Varelas, « Mechanical reliability of fiber bragg gratings », *thèse de l'EPFL*, 1998
- [5] J. Matthewson, « Optical Fiber Mechanical Testing Techniques », *Critical Reviews of Optical Science and Technology*, Vol.CR50, 1993
- [6] L.K.Baker, « Optical Fiber Mechanical Testing Techniques », *Documentation technique Corning*, 2001
- [7] C.R. Kurjian, "Single-valued strength of perfect silica fibers", *Appl. Phys. Lett.* 42, 1983
- [8] Glossop NDW, Dubois S, Tsaw W, Leblanc M, Lymer JL, Measures RM, Tennyson RC, « Optical fibre damage detection for an aircraft composite leading edge », *Composites* Vol.21 pp.71-80, 1990
- [9] Gu W, Kampe L, Lu GQ, « Correlation of fiber pull-out strength and interfacial vibration damping techniques by micromechanical analysis », *Journal of materials science letters* Vol.33, 5731-5737, 1998
- [10] K. Zolfaghar, M.J. Folkes, « The effect of surface coatings of optical fibers on the interfacial shear strength in epoxy resins ». *Journal of materials science letter*, Vol. 18, pp.2017-2020, 1999.
- [11] Carman G, Reifsnider K, « Analytical optimisation of coating properties for actuators and sensors », *J Intell Mater Syst Struct*, Vol 4 pp.89-97, 1993