



## Procédé de l'étude de la rupture des fibres à partir d'un essai en traction sur mèches

N. LAMAÏ<sup>1,2\*</sup>, Mohamed R'MILI<sup>1,3</sup>, M. SOULTAN<sup>1</sup>, A. MATIBEYE<sup>1</sup>, D. ALLAISSEM<sup>1</sup> et D. BONGO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut Universitaire des Sciences et Techniques d'Abéché, BP 130 Abéché, Tchad

<sup>2</sup> Université de Lyon, F-42023 Saint-Etienne, France et Université de Saint-Etienne, Jean Monnet, F-42000 Saint-Etienne, France LT2C EA 3523

<sup>3</sup> Université de Lyon, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, F-69621 Villeurbanne, Laboratoire MATEIS CNRS Bât. B. Pascal 5<sup>e</sup> étage 7, Avenue Jean Capelle, France

\* Correspondance, courriel : [lamaïhubert@yahoo.fr](mailto:lamaïhubert@yahoo.fr)

### Résumé

Le travail consiste à solliciter en traction des mèches de fibres de verre, en utilisant l'émission acoustique pour suivre en temps réel l'endommagement du matériau. En effet, les ruptures de fibres s'accompagnent de libération d'énergie sous formes d'ondes acoustiques, qui sont localisés et analysés ensuite. Les objectifs sont de suivre en temps réel par émission acoustique les ruptures de fibres et les localiser dans un premier temps, et de caractériser le comportement des fibres en fin de vie, afin de comparer les résultats avec les autres travaux. Deux types d'essais doivent être réalisés, ceci afin de pouvoir comparer les méthodes et les résultats avec ceux déjà obtenus. La procédure expérimentale est un aspect primordial des essais sur mèches, au niveau de la réalisation des échantillons et tout au long de l'essai. Des essais de traction devront être réalisés sur des mèches de 1000 fibres de verre E de longueur de jauge 60 mm ; ensuite les mèches seront lubrifiées par du pétrole avant la mise en charge, afin de réduire les frictions entre fibres, d'éviter les ruptures en cascade, et de favoriser la propagation des ondes. Deux capteurs résonnants placés aux extrémités de l'éprouvette permettent de détecter l'onde acoustique émise par la rupture d'une fibre, et de la transformer en signal électrique.

**Mots clés :** *fibres de verre E, résine, rupture, essai en traction, capteurs résonnants, extensomètre.*

### Abstract

#### The method of study of the fiber bundles from a tension test on highlights

The work is to apply tensile strands of glass fibers using acoustic emission to monitor in real time damage to the material. Indeed, fiber breakage is accompanied by release of energy in the form of acoustic waves, which are localized and then analyzed. The objectives are to follow in real time acoustic emission fiber breakage and locate at first, and to characterize the behavior of the fibers at the end of life, in order to compare the results with other work. Two types of tests must be performed, in order to compare methods and results with those already obtained. The experimental procedure is an important aspect of testing bits, at the realization of samples and throughout the trial.

Tensile tests should be performed on locks 1000 E-glass fibers of gauge length 60 mm and then the strands will lubricated with oil before charging to reduce friction between fibers, to avoid disruptions cascade, and promote the propagation of waves. Two resonant sensors placed at the ends of the specimen to detect the acoustic wave emitted by the rupture of a fiber, and into an electrical signal.

**Keywords :** *E-glass fibers, resin, breaking, tensile test, resonant sensors, extensometer.*

## 1. Introduction

Dans un composite renforcé par des fibres de verre, le renfort constitue l'élément fondamental dans la rupture du composite. Il est donc nécessaire de déterminer les caractéristiques mécaniques des fibres, pour prédire leur comportement à la rupture, et de prévoir leur durée de vie [1]. L'étude du comportement mécanique des matériaux par émission acoustique (EA) a connu un développement important dans les années 80 et se poursuit actuellement. Dans le cas des fibres, cette méthode permet d'obtenir les données nécessaires [2]. L'étude consiste à faire des essais de traction sur mèche de fibres de verre E [3]. Deux types d'essais seront confrontés : un essai de traction à charge constante et un essai de traction à vitesse de déformation imposée.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Modèles statistiques

#### *Distribution statistique des fibres*

En utilisant le, les propriétés mécaniques des fibres sont généralement décrites en termes de déformation  $\varepsilon$  plutôt qu'en termes de contraintes  $\sigma$ . Les deux descriptions sont équivalentes, ainsi la contrainte et la déformation appliquée suivent la loi de Hooke :  $\sigma = E_f \varepsilon$  avec  $E_f$  le module des fibres. Le modèle de weibull permet une analyse statistique de la rupture des matériaux fragiles présentant une distribution aléatoire des défauts. En général, pour évaluer les paramètres de la fonction de distribution caractéristique de la rupture des monofilaments, des essais de traction sur mèches sont réalisés sur des fibres unitaires. Cette distribution des contraintes à la rupture dans une mèche peut être décrite en utilisant une fonction de distribution de Weibull à deux paramètres ( $m$  et  $\varepsilon_0$ ), donnant la probabilité de survie  $P_s$  d'une fibre subissant la déformation  $\varepsilon$ .

$$P_s(\varepsilon) = \exp \left[ -L \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

Pour arriver à obtenir ces deux paramètres ( $m, \varepsilon_0$ ) dans le cas de monofilaments, il faut effectuer un grand nombre de tests pour avoir la meilleure précision possible. Les paramètres de weibull dépendent du matériau mais aussi de la vitesse de chargement à cause de la fissuration sous-critique. Connaissant la fonction de survie sur monofilaments, Coleman [4] a appliqué cette fonction à toute une mèche (cf. formule (2)), avec les hypothèses suivantes :

- Une mèche est constituée de fibres de même longueur L
- Les ruptures de fibres sont indépendantes (chaque fibre a sa propre fonction de Weibull)
- Lors de la rupture d'une fibre, la charge est répartie uniformément sur les fibres restantes
- La rupture d'une fibre est indépendante de la vitesse de déformation.

$$N_s = N_0 \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_L} \right)^m \right] \quad (2)$$

Avec :  $\varepsilon_L = \varepsilon_0 L^{1/m}$ .

$N_0$  : nombre de fibres initialement présentes

$N_s$  : nombre de fibres survivantes à la déformation  $\varepsilon$

$m$  : facteur de forme ; il décrit la largeur de distribution

A partir des travaux de Coleman, Chi et al. [5] ont établi la relation force déformation pour obtenir la formule (3), donnant la charge totale F supportés par la mèche en fonction de la déformation :

$$F(\varepsilon) = A \cdot E_f \cdot N_0 \cdot \varepsilon \cdot \exp \left[ -L \cdot \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \right] \quad (3)$$

$F$  : charge totale supportée par la mèche

$E_f$  : module de Young d'une fibre

$A$  : aire d'une fibre

$\varepsilon$  : déformation appliquée

$\varepsilon_0$  : facteur d'échelle

A partir de l'expression (2), la probabilité de survie s'écrit :  $S(\varepsilon) = \frac{N_s}{N_0}$  et  $0 \leq S(\varepsilon) \leq 1$ .

La distribution de déformation moyenne de rupture est calculée comme suit :

$$\bar{\varepsilon} = \int_0^{\infty} \varepsilon \frac{d(1-S)}{d\varepsilon} d\varepsilon = \int_0^{\infty} S(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4)$$

Où  $d(1-S)/d\varepsilon$  est la fonction de densité de probabilité d'échec. Pour une distribution uni modale de Weibull, la déformation moyenne de rupture a été déduite de (equ.6) de la forme analytique, soit :

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_1 \Gamma(1+1/m) \quad (5)$$

La déformation moyenne peut être déterminée numériquement à partir de la courbe S- $\varepsilon$ .

## 2-2. Emission Acoustique

Le contrôle par émission acoustique (EA) est une méthode capable de surveiller l'endommagement en temps réel. La technique d'émission acoustique est une technique très prometteuse à laquelle on accorde de plus en plus d'attention que ce soit pour le suivi de l'intégrité de structures en service ou pour l'étude des mécanismes de rupture.

### 2-3. Méthodes

La fibre de verre de type E ayant les caractéristiques suivantes (masse volumique  $2540 \text{ kg.m}^3$ ; module d'Young  $72000 \text{ Mpa}$ ; contrainte à la rupture  $3500 \text{ Mpa}$ ; allongement à la rupture  $4,4\%$ ) a été choisi pour conduire cette étude. Le système d'acquisition numérique MISTRAS 2001, commercialisé par Euro Physical Acoustics est utilisé pour détecter l'EA avec un seuil de  $32 \text{ dB}$ ; les deux capteurs résonnants ( $300 \text{ kHz}$ ) couplés avec de la graisse de silicone, sont disposés sur les têtes de l'éprouvette, et maintenus avec du ruban adhésif (*Figure 3*).

### 2-4. Préparation des échantillons

La procédure développée ci-dessous indique la démarche à suivre pour la réalisation d'éprouvettes mono mèches [6]. On suivra cette procédure pour la réalisation de mèches de 2000 fibres de verre E. La mèche est fixée à l'une de ses extrémités par une pince, puis mouillée avec du méthanol afin de faciliter sa manipulation et surtout afin d'aligner les filaments (*Figure 1a*). On positionne ensuite un petit tronçon de gaine thermorétractable (diamètre  $1,6 \text{ mm}$ ) sur la mèche (*Figure 1b*). Lors du chauffage, la gaine frette les fibres et les maintient en place. Celle-ci permet à la fois de fixer l'extensomètre et de mieux définir la longueur utile, en empêchant toute diffusion de la résine par capillarité dans la partie utile de la mèche au cours des étapes suivantes. La réalisation des têtes de l'éprouvette est effectuée ensuite en deux temps. Tout d'abord, la partie de la mèche constituant la tête est imprégnée de résine (*Figure 1c*): cela est réalisé au moyen d'une gaine thermorétractable (diamètre  $3 \text{ mm}$ ), enfilée sur la mèche, remplie de résine (Araldite®) au moyen d'une seringue et légèrement chauffée pour faire pénétrer la résine entre les fibres.

Cette portion de mèche imprégnée est polymérisée par étuvage de  $30\text{-}40 \text{ min}$  à  $70^\circ\text{C}$ . La mèche est retournée pour la préparation de façon identique de la seconde tête (reprise des trois étapes précédentes). L'extrémité de la mèche est alors positionnée dans un tube métallique de  $20 \text{ mm}$  de longueur, rempli de résine (*Figure 1d*) ci-dessous). Le plus grand soin doit être apporté au centrage de la mèche dans le tube lors de la polymérisation de la résine. L'utilisation du tube métallique permettra ultérieurement un serrage uniforme dans les mors sans affecter les fibres. Pour éviter un éventuel couplage des fibres lié à l'interaction chimique entre l'alcool et l'ensimage, la mèche est enroulée autour d'un tube en Plexiglas® de grand diamètre ( $30 \text{ mm}$ ). Cette opération permet d'éviter d'avoir recours à un chauffage de la mèche ou à l'utilisation d'un solvant, opérations risquant de dégrader la fibre.

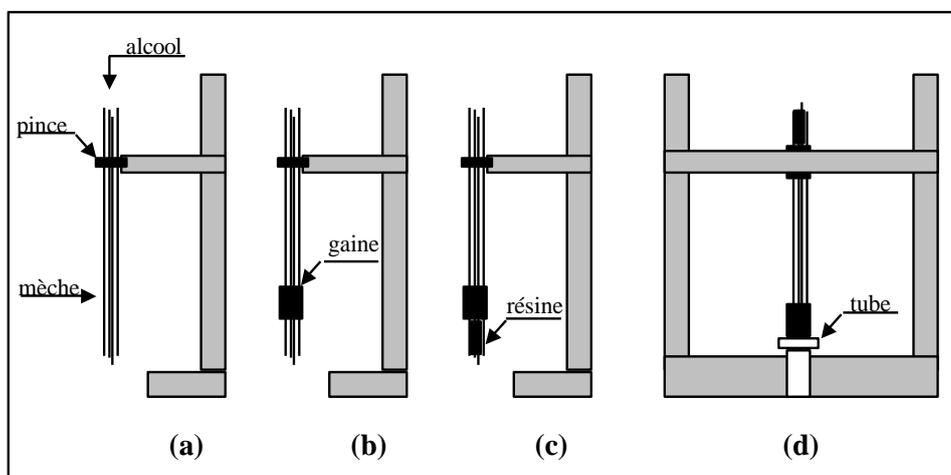
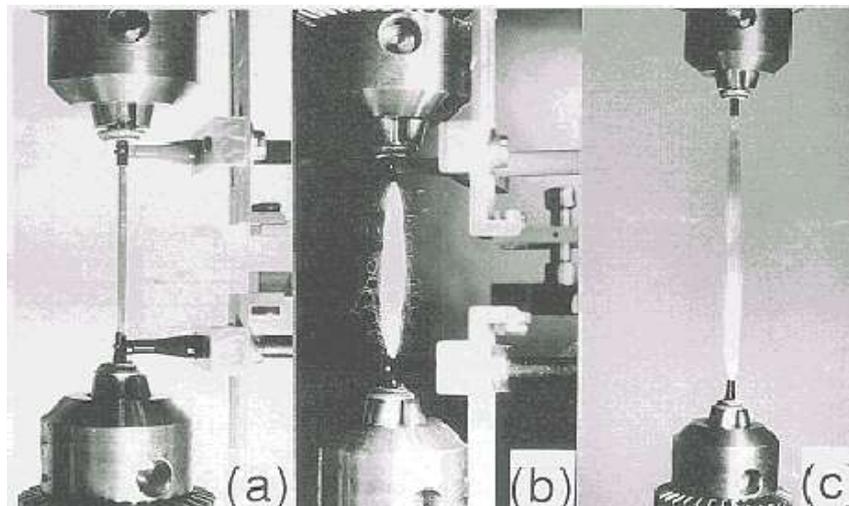


Figure 1 : Différentes étapes de la réalisation des éprouvettes

### 3. Résultats et discussion

#### 3-1. Essai en traction

La mise en place de la mèche sur la machine de traction (*Figure 1a*) ou sur le montage à charge constante (figure 1b) comporte d'abord la suspension libre de la mèche, donc en condition de torsion nulle après fixation de la tête supérieure au mors fixe, puis le déplacement de la traverse mobile ou simplement le rapprochement du mors inférieur jusqu'à amarrage de la partie inférieure de l'échantillon. L'essai de traction à charge monotone doit être utilisé pour vérifier les données des travaux effectués dans ce domaine : les paramètres de Weibull et la charge maximum supportée par la mèche de 2000 fibres ( $P_{max} = 25$  kg). Dans les essais à charge constante, on impose un certain pourcentage de  $P_{max}$  que l'on fera varier entre 92% et 100% de  $P_{max}$ . Un capteur de force est fixé pour vérifier le chargement, et un extensomètre est placé aux extrémités des fibres sur la gaine thermorétractable pour une mesure directe de la déformation. Enfin, ces données sont envoyées sur un ordinateur qui les enregistre en fonction du temps.



**Figure 2 :** *Essai en traction*

La *Figure 2* ci-dessus montre l'aspect de la mèche durant l'essai de traction. La photo (a) montre le début de l'essai. En cours d'essai (b), les fibres cassées sont déplacées d'elles-mêmes vers l'extérieur ; la photo (c) montre la mèche non rompue.

#### 3-2. Technique de l'émission acoustique

Le système d'acquisition numérique MISTRAS 2001, commercialisé par Euro Physical Acoustics est utilisé pour détecter l'EA avec un seuil de 32 dB. Cette valeur réglée préalablement à l'essai permet d'éliminer certains bruits parasites. Les deux capteurs résonnants (300 kHz) couplés avec de la graisse de silicone, sont disposés sur les têtes de l'éprouvette, et maintenus avec du ruban adhésif (*Figure 3*). Les paramètres d'EA sont choisis d'après les résultats obtenus lors d'études précédentes : PDT / HDT / HLT = 50 / 100 / 300  $\mu$ s. Le PDT est le Peak définition Time qui caractérise le temps de montée. Le HDT est le Hit Definition Time qui caractérise la durée du signal. Enfin, le HLT est le Hit Lockout Time qui correspond à une plage d'inhibition de l'acquisition. Elle permet d'éviter les échos qui proviennent entre autres des réflexions du signal dans l'éprouvette.



**Figure 3 : Mèches, capteurs**

### 3-3. Discussion

Les avantages tirés au cours de l'étude doivent respecter les conditions suivantes :

- Préparation des éprouvettes avec le plus grand soin,
- Un seul essai,
- Evités tous problèmes liés à la capillarité,
- Mesure directe de la déformation.

### 4. Conclusion

En fin d'étude, il faudrait obtenir une confirmation de la validité acoustique dans l'analyse du comportement des fibres de verre E. Notamment, l'obtention d'une rupture contrôlée de la mèche qui permettra d'aboutir à des ruptures de fibres aléatoires et réparties sur toute la longueur utile de la mèche.

### Références

- [1] - Joseph Henry Suivi de l'endommagement en fatigue d'un composite à renfort interlock carbone/époxy par émission acoustique *Matériaux et Techniques*, Vol.100, N°6 (2012)
- [2] - Nathalie Godin Identification de la signature acoustique des différents mécanismes d'endommagement lors d'essais de fatigue sur CMC *Revue des composites et des matériaux avancés*, Vol.23, N°11/2013 (2013)
- [3] - M.R'MILI, J.Lamon Investigation of subcritical crack growth using load relaxation tests on fiber bundles *Journal : Acta Materialia - ACTA MATER* , Vol. 59, No. 7, pp. 2850-2857, 2011

- [4] - Coleman BD .On the strength of classical fibers bundle. J Mech Phys Solids1958 ;7 :60-70
- [5] - Z.Chi, T.W.Chou,G.Shen : Determination of single fibre strength distribution from fibre bundle testings.J.M.S19 (1984)3319-3324.
- [6] - Daniels HE. The statistical theory of the strength of bundles of threads.Proc R Soc1945 ; A183 :405-35
- [7] - Manders PW, Chou TW .Variability of carbon and glass fibres and the strength of aligned composites. J Reinf Plast Comp 1983 ;2 :43-59.
- [8] - Evans KE, Caddock BO,Ainsworth KL.Statistical change during the corrosion of glass fibre bundle.J.M.S23 (1988) 2926-2930.
- [9] - A. Cowking, A. Attou, A.M. Siddiqui, M.A.S. Sweet, R. Hill : Testing E-glass fibre bundles using acoustic emission. Journal of Materials Science 26 (1991), pages 1301-1310
- [10] - M.R'Mili ; V.Massardier, P.Merle , H.Vincent, C.Vincent : The effect of thermal exposure on the strength distribution of B<sub>4</sub>C coated carbon fibers.Carbon 37 (1999) 129-145.
- [11] - N.Lissart, J.Lamon : Evaluation des caractéristiques de rupture des monofilaments à partir d'un essai de traction sur mèches; AMAC 9vol2 589-598.
- [12] - M. R'Mili, M. Murat : Caractérisation des fibres par amélioration de l'essai sur mèche avec mesure directe de la déformation. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 324, Série II b (1997), pages 355-364
- [13] - M. R'Mili ; T.Bouchaour ; .Merle : Estimation of Weibull parameters from loose-bundle test. Composites Science and Technology; .56,Issue7,1996,p.831-834.
- [14] - Emmanuel Maillet, Analyse de la libération d'énergie des sources d'émission acoustique pour la prévision de la durée de vie de CMC lors d'essais de fatigue statique en température Matériaux et Techniques, Vol.100, N°6 (2012)