

## Influence du sens de moulage sur le comportement mécanique et l'aspect probabiliste de la rupture en flexion d'un matériau composite perlon-verre-acrylique.

S. Achouri<sup>1,2</sup> B. Redjel<sup>1</sup>, D. Berdjane<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Scientific and Technical Research Center in Welding and Control C.S.C - Unit of industrial research in metallurgy iron and steel industry, Annaba, Algeria.

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie Civil, Département Génie Civil, BP 12, Université Badji Mokhtar, 23000, Annaba, Algeria.

**Résumé** -- Des essais de flexion trois points effectués sur un stratifié à 6 couches verre-perlon-acrylique (V- 4P-V) à usage orthopédique ont permis d'identifier ses caractéristiques mécaniques et de mettre en évidence l'influence du sens de découpe des échantillons sur ces dernières. Ces propriétés mécaniques qui se caractérisent par une dispersion affichent dans la direction du flux de moulage des valeurs de contrainte à la rupture et du module de Young inférieures à celles mesurées dans la direction perpendiculaire au flux de moulage. L'utilisation du modèle probabiliste de Weibull a permis d'identifier le facteur d'inhomogénéité ou module de Weibull dans les deux directions de découpe et de décrire l'aspect probabiliste de la rupture de ces stratifiés.

**Mots clés:** stratifié – perlon – flexion – module de Weibull – sens de découpe

### I. Introduction

Les scénarios de rupture dans les matériaux composites sont sensibles aux conditions d'empilement et aux défauts intrinsèques ou fabriqués [1-2]. Les défauts initiaux qui peuvent être de différentes natures sont souvent le résultat d'imperfections dues à des aléas de fabrication. L'initiation de la rupture dans les matériaux composites se produit généralement bien avant l'observation d'un changement du comportement macroscopique [3]. Il est clair que les propriétés rhéologiques et mécaniques des matériaux composites étant fortement liées aux propriétés de l'interface, un mauvais état de cette dernière peut avoir des conséquences néfastes sur leurs performances.

Tous les matériaux entrant dans la fabrication des appareils de prothèse ou d'orthopédie doivent être de premier choix et ne doivent présenter aucune défautuosité et ne subir aucun traitement susceptible d'en dissimuler les défauts [4-5]. Les matériaux composites à base de résine acrylique renforcée de fibres de verre sont les matières plastiques renforcées les plus utilisées dans l'industrie de fabrication des appareillages à usage orthopédiques pour les personnes handicapées. Selon la formulation et les exigences d'utilisation, ils peuvent se présenter sous la forme de produits légers, transparents, translucides ou opaques, colorés ou incolores sans limitation quant aux dimensions de l'objet à fabriquer [6]. La plupart des méthodes de mise en œuvre pour la fabrication de ces produits spécifiques consistent à élaborer des pièces en matériaux composites répondant à toutes les exigences de forme et de cadence par des couches successives comportant une matrice et des renforts pour avoir un matériau composite stratifié [7].

---

**Corresponding author:** Bachir REDJEL

Research field: Mécanique appliquée et Matériaux  
Adress. Labo Génie Civil, Université Badji Mokhtar,  
BP 12, 23000, Annaba, Algérie  
E-mail: [bredjel@yahoo.fr](mailto:bredjel@yahoo.fr).

Les mécanismes de rupture induits dépendent alors de la nature des constituants, de l'architecture des couches, des séquences d'empilement et du mode de sollicitation mécanique imposé [8].

Cette étude porte sur l'élaboration et la caractérisation d'un matériau composite à usage orthopédique utilisé dans la fabrication des prothèses orthopédiques de l'ONAAPH – Algérie pour les personnes handicapées et résultant de l'association d'une résine et de renforts en verre ainsi que de l'absorbant de la résine qui est le perlon.

## II. Méthodologie expérimentale

### II.1 Matériau et éprouvettes

Le matériau ayant servi à la fabrication des éprouvettes est un stratifié à base de résine acrylique renforcée de tissu de verre E et de perlon utilisé dans la fabrication de prothèses orthopédiques par l'office national d'appareillage et d'accessoire pour personnes handicapées Annaba (ONAAPH) -Algérie. Le mode d'obtention adopté pour la fabrication des éprouvettes est le même que celui utilisé dans la fabrication des prothèses. L'obtention de plaques ayant servi à la découpe des éprouvettes a nécessité une adaptation apportée à la forme géométrique.

Le moule supérieur à base de bois est fixé sur un étau et est par la suite couvert d'une mince couche de film en PVA qui sert d'isolant pour éviter le collage de la résine liquide au bois. Les renforts sont ensuite empilés selon un ordre choisi et défini au préalable. Le perlon est empilé à la surface pour des raisons à la fois esthétique et de résistance atmosphérique (humidité). Les renforts sont tirés et serrés dans le sens de l'empilement. L'ensemble est ensuite couvert par un sac en plastique.

Le matériau ayant servi à la fabrication des éprouvettes est ainsi un stratifié composé de renforts de verre E et de perlon et d'une résine acrylique. La stratification est limitée à 6 plis pour des éprouvettes d'épaisseur raisonnable d'environ 3 mm en moyenne. L'architecture adoptée est symétrique de type V-4P-V avec un empilement constitué d'une couche de verre sur la peau inférieure, de 4 couches de perlon au

cœur du stratifié et d'une couche de verre sur la face supérieure comme schématisé sur la figure 1.

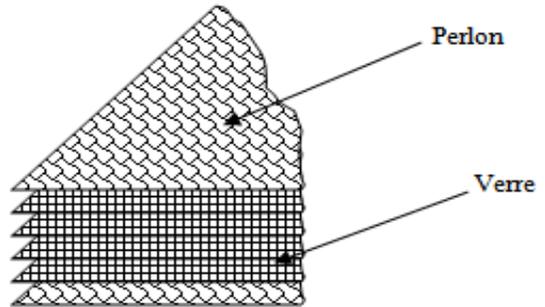


Fig. 1 Architecture d'empilement V-4P-V

L'élimination du vide au sein du moule entre les deux sacs se fait au moyen d'un aspirateur d'air ou pompe à vide. Le mélange de la résine est préparé séparément du moule puis il est versé dans ce dernier rapidement. Les éléments additifs sont le durcisseur et la pâte colorante. La période de durcissement de la résine varie de 15 à 20 minutes (figure 2).



Fig.2 fabrication de plaque en composite.

Dans cette étude, les concepts des prothèses à considérer sont ceux relatifs aux membres inférieurs car ils doivent assurer la statique du corps et permettre la locomotion et la mobilité du mutilé.

Les éprouvettes ont été découpées à partir des plaques moulées à l'aide d'une scie diamantée spéciale selon 2 directions : un sens de découpe dans le sens du moulage et un autre dans le sens perpendiculaire à ce dernier (figure3). Ces éprouvettes sont des barreaux de forme prismatique de longueur 80 mm, de largeur 16 mm et de 3 mm d'épaisseur en moyenne. La distance entre appui est prise égale à 64 mm c'est-

à-dire correspondante à un rapport distance entre appui/largeur égal à 4.



Fig.3 Découpe des éprouvette en composite.

## II.2 Dispositif d'essai de flexion

Les essais de flexion 3 points statique ont été réalisés sur une machine d'une capacité de 5 KN à une vitesse de la traverse de 5 mm/mn. La figure 4. montre le dispositif utilisé. Tous les tests sont menés jusqu'à la rupture complète des échantillons.



Fig. 4. Dispositif de flexion 3 points utilisé

L'analyse morphologique des éprouvettes testées est investiguée par des observations microscopiques des faciès de rupture à l'aide d'un microscope optique numérique à différents agrandissements.

## III. Résultats et discussion

### III.1 Courbes charge- déformation

La figure 5 montre un exemple de l'évolution des courbes charge – flèche dans la direction du flux de moulage. Le même type de comportement est observé dans la direction perpendiculaire au flux de moulage (figure 6).

Ces courbes présentent la même allure en général et sont initialement linéaires matérialisant la réponse élastique de ces matériaux puis dévient de la linéarité traduisant l'endommagement qui s'opère et se développe au sein du volume sous forme d'une déchirure du composite avant la chute brusque et instable de la charge.

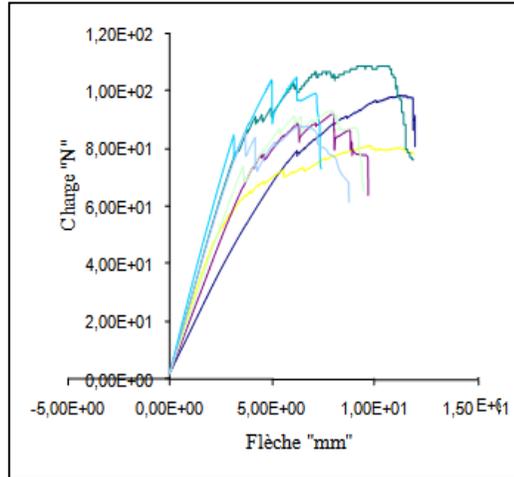


Fig. 5. Exemple de relevé de courbes charge – flèche dans la direction du flux de moulage.

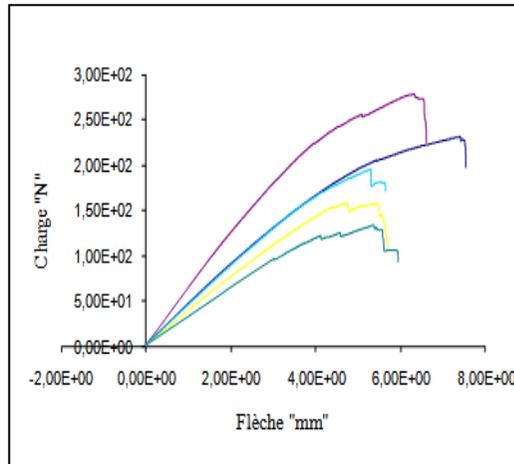


Fig. 6.Exemple de relevé de courbes charge – flèche dans la direction perpendiculaire au flux de Moulage.

### III.2 Caractéristiques mécaniques mesurées

Les résultats de mesure des caractéristiques mécaniques en flexion pour les deux directions du flux de moulage sont rassemblés dans le tableau 1. Les chiffres entre parenthèses

représentent les coefficients de variation calculés en pourcentage. Ces résultats se caractérisent par une dispersion acceptée aujourd'hui comme une caractéristique intrinsèque des matériaux composites. Elle est due essentiellement à l'hétérogénéité de la structure des matériaux ainsi qu'à la présence de défauts de taille, de dimension, d'orientation et de densité différente au sein du volume. Ces défauts sont introduits de diverses façons pendant l'élaboration ou lors de la préparation des éprouvettes.

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques du composite étudié

<i>Direction</i>	<i>Sens moulage</i>	<i>Sens perpendiculaire</i>
Contrainte (MPa)	54 (11%)	89 (18%)
Module de Young (MPa)	2933(11%)	3733 (10%)

Par ailleurs, Il est à noter que l'effet géométrique du à des variations dans l'épaisseur des éprouvettes induites lors du moulage des plaques mène probablement à des conditions d'essais variant d'un échantillon à un autre. La figure 7 illustre des défauts géométriques du à des différences d'épaisseur dans une même plaque.

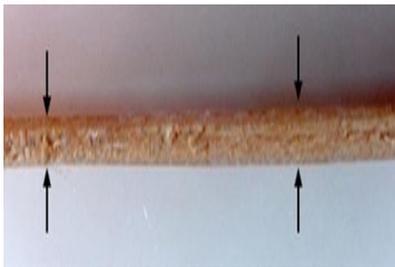


Fig.7. Différences des épaisseurs.

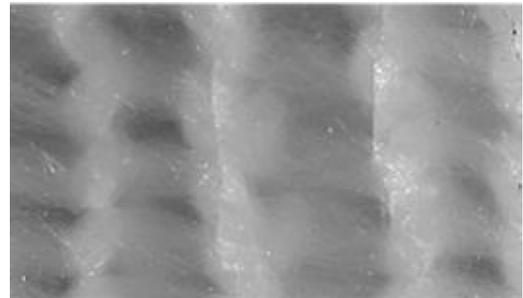
### III.3 Influence du sens de moulage

Les valeurs des contraintes et des modules élastiques dans la direction perpendiculaire au flux de moulage sont supérieures à celles mesurées dans la direction du flux de moulage. Les rapports sont de 1,65 et de 1,27 respectivement entre les valeurs des contraintes et entre celles des modules élastiques. Cette différence s'explique par la méthode de tirage du tissu de verre qui est un peu libre dans la direction de flux du moulage que dans celui

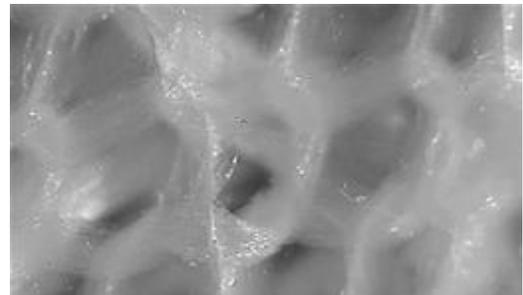
perpendiculaire. Dans cette situation les nœuds dans le sens du moulage sont très proches, ce qui provoque des concentrations de contraintes. D'autre part, les efforts de frottement entre les fibres de verre dans les nœuds contribuent aussi à amplifier le phénomène.

### III.4 Observations microscopiques

Les observations microscopiques effectuées ont permis de constater que la déchirure suit en général le chemin des nœuds du tissu de verre. La propagation de la rupture est toujours accompagnée d'un changement d'aspect et d'une décoloration du composite qui change vers la couleur blanche. La figure 8 illustre un exemple de ce phénomène. La déchirure présente en général des déchaussements de fibres de verre et de perlon. Ce dernier s'opère sans décollement de la matrice laissant penser que l'interface fibre-matrice est probablement moins résistante que la matrice elle-même. Les mécanismes de rupture les plus fréquents sont le délaminage, la rupture des fibres ainsi que la rupture de la matrice caractérisée par des craquelures.



a-Sens du moulage



b-sens perpendiculaire

Fig. 8 Décoloration localisée d'éprouvettes testées en flexion (agrandissement 10<sup>2</sup>)

#### IV. Modèle probabiliste de Weibull et son application

C'est un modèle empirique de comportement probabiliste de la rupture qui repose sur le fait que la résistance d'une chaîne est gouvernée par son maillon le plus faible. Il en est de même pour un ensemble de chaîne.

Selon cette théorie la probabilité de rupture d'un matériau de volume  $V$ , soumis à une distribution de contraintes  $\sigma$  est donnée par [10] :

$$P(\sigma_f) = 1 - \exp \left[ \int_V f(\sigma) dV \right] \quad (1)$$

avec:

$$\begin{cases} f(\sigma) = \left[ -V \left( \frac{\sigma - \sigma_u}{\bar{\sigma}} \right)^m \right] & \text{pour } \sigma > \sigma_u \\ f(\sigma) = 0 & \text{pour } \sigma < \sigma_u \end{cases}$$

$\sigma_u$ ,  $\bar{\sigma}$  et  $m$  sont respectivement la contrainte appliquée, la contrainte au dessous de laquelle la probabilité de rupture est nulle prise égale à 0, la contrainte de normalisation sans signification physique obtenue pour une probabilité de rupture de 0,632 et le facteur d'inhomogénéité appelé module de Weibull.

Les deux paramètres  $\bar{\sigma}$  et  $m$  sont considérés comme des propriétés du matériau. Ainsi le risque de rupture n'est fonction que de la distribution des contraintes dans l'éprouvette essayée.

Pour la flexion 3 points, Weil et Daniel [11] donnent pour le risque de rupture  $B$ , l'expression :

$$B = \frac{V_f}{2(m+1)^2} \left( \frac{\sigma_f}{\bar{\sigma}} \right)^m \quad (2)$$

L'indice  $f$  est relatif à la flexion 3 point et  $\sigma_f$  correspond à la contrainte appliquée à l'extrémité de la zone la plus tendue de l'éprouvette. Ainsi la probabilité de rupture en flexion devient

$$P(\sigma_f) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma_f}{\bar{\sigma}_f} \right)^m \right] \quad (3)$$

Avec

$$\bar{\sigma}_f = \bar{\sigma} \left[ \frac{2(m+1)^m}{V_f} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

Le calcul de la probabilité de rupture  $P(\sigma_f)$  est établi en utilisant l'estimateur ayant pour expression du rang médian

$$P(\sigma_f) = i/(n+1) \quad (5)$$

$i$  et  $n$  sont respectivement le rang et le nombre d'échantillon.

La technique la plus utilisée pour la détermination du paramètre de Weibull consiste en la linéarisation de l'équation (3) de la probabilité de rupture :

$$\begin{aligned} \text{Ln} [\text{Ln} (1/(1-P(\sigma_f)))] &= m \cdot \text{Ln} (\sigma - \sigma_u) + \text{Ln} V_f - m \\ \text{Ln} \bar{\sigma} &= 2(m+1) \end{aligned} \quad (6)$$

La pente de cette droite permet de calculer le paramètre  $m$  de Weibull. Le lecteur intéressé trouvera tous les détails de cette méthode dans les références [11-12].

Ainsi une analyse statistique par la théorie de Weibull appliquée à la rupture des matériaux composites devient intéressante afin de mieux comprendre leur comportement à la rupture ainsi que l'aspect probabiliste de cette dernière.

La figure 9 montre la variation de la probabilité de rupture en fonction de la contrainte à la rupture pour les deux sens du flux de moulage. Comme il apparait sur cette figure, l'aspect des courbes de distribution est conforme pour les deux sens de moulage (flux).

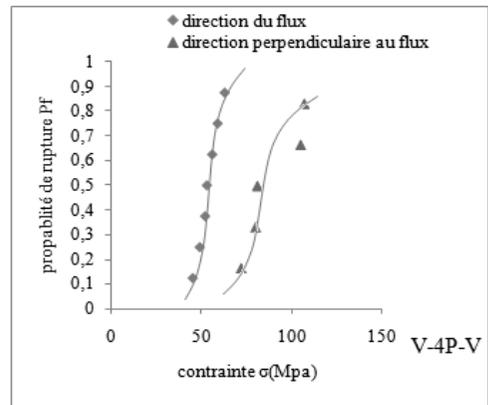


Fig.9 variation de la probabilité de rupture en fonction de la variation de la contrainte à la rupture.

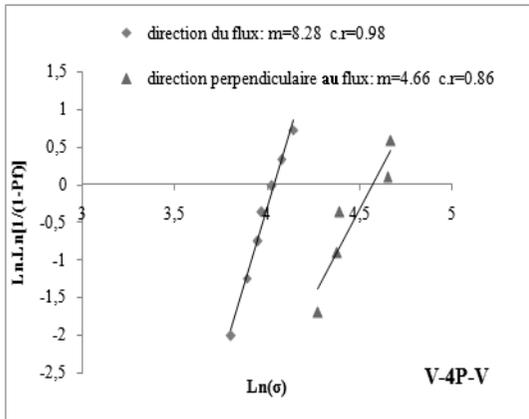


Fig. 10 Estimation du paramètre de Weibull pour le stratifié découpé dans le sens perpendiculaire au sens du moulage.

La figure 10 montre les illustrations de la variation de  $\ln [Ln (1/(1-P_f))]$  en fonction de  $\ln(\sigma)$ . Une dispersion des points expérimentaux autour des droites de régression linéaire est constatée. Les interpolations linéaires effectuées ont permis d'évaluer le facteur d'inhomogénéité ou module de Weibull pour les deux cas de découpe donné par les pentes des droites de régression linéaire. Les valeurs obtenues sont 8,3 et 4,65 respectivement dans le cas de découpe dans la direction du flux de moulage et dans le cas de la direction perpendiculaire au flux du moulage. Cette dernière valeur est faible traduisant le degré de dispersion élevé observé sur les contraintes à la rupture dans ce sens de découpe. Il est à noter que le nombre d'échantillons réduits utilisé dans les deux sens et principalement dans le sens perpendiculaire au flux est un facteur déterminant amplifiant la dispersion. La valeur du coefficient de corrélation de 0,86 dans ce dernier cas est très significative et illustrative du phénomène dispersif des points expérimentaux autour de la droite de régression.

## V. Conclusion

Les résultats de mesure des caractéristiques mécaniques des composites verre-perlon acrylique à usage orthopédique se distinguent par une forte dispersion due en grande partie à la présence de défauts de différentes taille, forme et orientation distribués de façon aléatoire au sein du volume des éprouvettes.

La mise en œuvre et la qualité du composite produit est conditionné par l'absorption parfaite de l'air emprisonné à l'intérieur du moule.

Les caractéristiques mécaniques mesurées dans la direction du flux de moulage sont inférieures à celles mesurées dans la direction perpendiculaire. Le module de Weibull est faible dans la direction perpendiculaire au flux de moulage par rapport à celui mesuré dans la direction du flux de moulage confirmant la forte dispersion des résultats des contraintes à la rupture observée dans le premier cas.

## VI. Bibliographie

- [1] Feld, N, Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, (5 Déc. 2011).
- [2] Bertolini, J, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, (10 Avril 2008).
- [3] Mummery, P, Derby, Materials Science and Engineering, **A135**, (1991).
- [4] Sbiai, A, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (03 Juin 2011).
- [5] Achouri, S, Benamira, M, & Redjel, B, 5<sup>èmes</sup> Journées de Mécanique JM'05, Bordj El-Bahri (Algérie), Ecole Militaire Polytechnique, (29 Mars 2006).
- [6] Cahier des charges des appareillages, Ministère du travail et des affaires sociales, Commission Nationale de la Nomenclature des Appareillages, (1993).
- [7] Berthelot, J.M, Edition Masson, (1992).
- [8] Mc Guinness, G.B, Bradaigh, C.M.O, composites part A: Applied Science and manufacturing, pp.115-132, (1998).
- [9] Achouri, S, Redjel, B, Fatmi, L, 1<sup>ères</sup> Journées Internationales de Physique des Matériaux et ses Applications, Annaba, Algérie (25-27 Novembre 2007).
- [10] Achouri, S, Redjel, B, Fatmi, L, Journal of Advanced Materials, **5**, pp. 225-228, Nov. (2008).
- [11] Redjel, B, cours de post graduation : mécanique des matériaux, Génie Civil, Université de Annaba, (2006).
- [12] Fantozzi, G, cours de 5<sup>ème</sup> année, département génie physique matériaux et génie mécanique développement, INSA Lyon, France.