



## APPLICATION DE LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE AUX ESSAI DE CHOC D'UN MATERIAU COMPOSITE.

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

1 : Centre de recherches scientifique et technique en soudage et contrôle - Urasm-CSC- Annaba BP 196 – Algérie (e.mail : souma\_sihem@yahoo.fr)

2 : Laboratoire de Génie Civil, Université de Annaba, BP 12, Annaba (email [bredjel@yahoo.fr](mailto:bredjel@yahoo.fr))

### Résumé :

Ce travail présente une étude expérimentale de la rupture de matériau composite perlon verre\_ polyester, utilisé dans la fabrication des prothèses orthopédiques et fabriqué au niveau de l'ONNAPH de Annaba par la mesure du taux de restitution d'énergie (G). Ce concept fait intervenir la notion d'énergie de rupture. Ce qui permet dans un sens de quantifier la résistance à la rupture à travers la mesure d'une valeur critique du taux de restitution d'énergie ( $G_C$ ). Dans cette optique, des essais de choc sur mouton pendule destiné aux matériaux composites ont été réalisés sur des éprouvettes entaillées.. L'analyse des courbes (énergie \_  $BW\phi$  ) est complétée par des observations visuelles des ruines.

**Mots clés :** composite, tissu, fissuration, énergie de rupture.

### 1 Introduction

L'utilisation des matériaux composites connaît ces dernières années une expansion remarquable. Ce qui leur permet de pénétrer des marchés de la mécanique jusqu'alors traditionnellement réservés aux matériaux métalliques. Ce type de matériau est exploité avec succès dans la fabrication des prothèses orthopédiques pour les personnes handicapées. L'intérêt porté à l'égard des composites dans ce domaine réside dans la volonté de réduire le poids de la structure et d'assurer une bonne résistance mécanique tout en garantissant une aptitude au formage simple et peu coûteux.

Cependant, il apparaît que cette utilisation accrue demeure dans certains cas fortuite. Ce qui fait que des problèmes liés généralement à la fabrication sont plutôt à l'origine d'un grand nombre de défaillances des pièces et structures à base de polymères renforcés. Des ruptures prématurées peuvent être dues à certains défauts introduits au moment de la transformation, et à des facteurs non ou mal considérés lors de la conception ou encore à une mauvaise utilisation des pièces [1].

Les défauts telles que les porosités, créés lors de la mise en forme dépendent entre autres des paramètres d'injection. Une optimisation de ces paramètres permet minimiser le risque de création du vide [2]. Ainsi, en tenant compte de l'influence directe des constituants de base du composite et son architecture sur le comportement mécanique et le mode d'endommagement résultant, de nombreux travaux visent à priori la modélisation tant numérique qu'expérimentale de son comportement et de ces caractéristiques mécaniques ; cas du renfort tissé [3].



D'autre part, les phénomènes qui précèdent la ruine des structures en matériaux composites sont principalement pilotés par des efforts à l'interface entre couches. Ceci est évident si l'on considère le délaminage et la microfissuration transverse [4]. La prise en compte des contraintes résiduelles dans l'étude de l'évolution d'endommagement permet à travers des modèles simplifiés de traiter uniquement la fissuration transverse dans le cas où l'état d'endommagement n'est pas trop important [5].

Que ce soit en chargement statique ou dynamique la séquence d'empilement des couches des renforts influe sur le comportement des stratifiés et engendre différents modes d'endommagement entraînant la rupture [6].

L'endommagement des composites résulte de nombreux mécanismes élémentaires de rupture tels que : la microfissuration de la matrice, la rupture unitaire des fibres ainsi que de l'endommagement interlaminaire ou délaminage. Ce dernier se manifeste soit par la décohésion de l'interface fibre/matrice ou par l'arrachement des fibres [4,7].

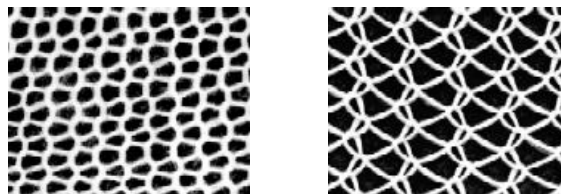
Par ailleurs, la propagation d'une fissure préexistante lors d'un chargement devient difficilement modélisable à cause des différents mécanismes qui peuvent avoir lieu simultanément [7].

L'objectif de ce travail rentre dans le cadre d'une caractérisation sous chargement dynamique d'un matériau composite à usage orthopédique, constitué d'une matrice polyester renforcé des couches de tissu de perlon et de verre, élaboré par l'ONAAPH. Et ce dans le but de déterminer la résistance à la fissuration du composite. L'analyse morphologique est investiguée par des observations macro.

## 2 Méthodes expérimentale

### 2.1 Matériau

Le matériau étudié est constitué d'une résine polyester initialement sous forme d'un liquide visqueux, et des renforts verre et perlon. La figure 1 montre l'architecture des tissus utilisés comme renforts.



(a) Tissu de Perlon

(b) Tissu de verre E

Figure 1.: Les renforts utilisés

Des éléments additifs qui sont nécessaires à la polymérisation tels que le catalyseur de durcissement et l'accélérateur sont additionnés selon des quantités déterminées, ainsi qu'une pâte colorante dont l'utilisation se révèle d'ordre esthétique pour se rapprocher au mieux de la couleur de la peau des patients. Les principales caractéristiques des renforts et de la matrice sont regroupées dans le tableau 1 et 2. Le mode d'obtention adopté pour la fabrication des éprouvettes est le moulage au sac sous vide, c'est le même procédé utilisé dans le cas des prothèses. L'adaptation apportée se limite à la forme géométrique du moule pour permettre l'obtention de plaquettes qui serviront à la découpe des éprouvettes.



**Tableau 1-** Propriétés mécaniques des renforts

Renfort t	$\sigma_{tr}$ (Mpa)	E (Mpa)	$\epsilon_{Rup}$ (%)
Verre E	3400	73000	4.8
Perlon	950	7000	15

**Tableau 2-** Caractéristiques de la résine polyester

Densité	1.10 à 1.20
Résis. Trac. (Mpa)	50-70
Module d'élast. Flex. (Mpa)	3500- 5700
Résistance en flexion (Mpa)	90-100
Résistance au choc (Kj/cm <sup>2</sup> )	2-5

## 2.2 Eprouvettes

Les éprouvettes ont été découpées à partir de plaques selon les dimensions indiquées sur la figure 2, au moyen d'une scie circulaire en carbure de 300 mm de diamètre.

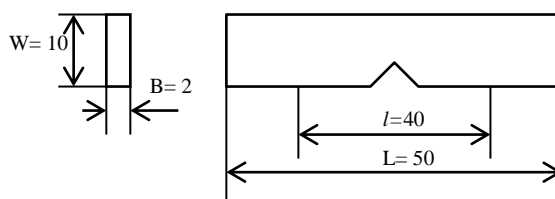


Figure 2: Géométrie et dimensions des éprouvettes

Les entailles sont du type SEN (*Single Edge Notche*), type B et C, figure 3, et sont effectuées de façon à satisfaire la condition suivante :

$$0,2 < a/w < 0,6$$

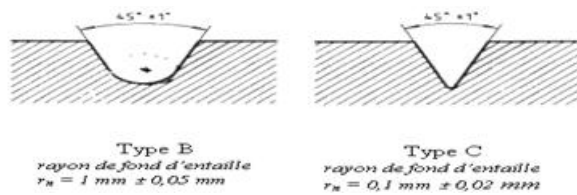


Figure 3: Géométrie des entailles B et C

La distance entre appuis est calculée selon le rapport :

$$L/W = 4$$

### 2.3 Dispositif expérimental

Les mesures expérimentales sont effectuées suite à une série d'essais sur un mouton pendule type Charpy destiné aux matériaux composites à matrice plastique. Figure 4.



Figure 4: Dispositif d'essai

### 2.4 Approche expérimentale de mesure du $G_{IC}$

La mécanique de la rupture est un outil de description quantitatif des phénomènes de rupture .Elle permet de relier la résistance à la fissuration du matériau aux conditions de sollicitation de toute la structure. Cette description quantitative ce fait à travers la mesure expérimentale des paramètres de la ténacité :  $K_C$  , $G_C$  .

Une approche énergétique développé par *GRIFTH*, qui considère la manière selon laquelle le matériau restitue de l'énergie en cours de sa fissuration et qui permet de remonter à  $G$ . L'énergie de rupture ou taux de restitution d'énergie mesurée en choc a été déterminée par la méthode de C.E Turner et J.G. Williams [8]. Cette méthode permet de représenter graphiquement des courbes expriment l'énergie totale perdue par le marteau où emmagasinée par l'éprouvette au moment de l'impact en fonction des surfaces rompue à partir de l'équation (1).



$$U = G_{IC} BW\emptyset \quad (1)$$

Soit :

U : énergie emmagasinée

$G_{IC}$  : taux restitution d'énergie critique en mode I

W : Largeur de l'éprouvette

B : épaisseur de l'éprouvette

$\emptyset$  : facteur de forme relatif à l'essai

### 3 Resultats et discussion :

Les tableaux 3, 4 et 5 regroupent respectivement les résultats des essais relatifs au type SEN, B et C.

**Tableau 3-** Résultats des essais relatifs au type SEN

N <sup>0</sup>	a /w	$\emptyset$	BW $\emptyset$ (mm <sup>2</sup> )	U (J)
1	0,72	0,155	17,41	0,43
2	0,39	0,399	08,294	0,37
3	0,41	0,324	11,743	0,35
4	0,24	0,587	05,448	0,30
5	0,72	0,155	17,399	0,26

**Tableau 4-** résultats des essais relatifs au type B

N <sup>0</sup>	a /w	$\emptyset$	BW $\emptyset$ (mm <sup>2</sup> )	U (J)
1	0,26	0,425	05,78	0,40
2	0,27	0,417	08,585	0,28
3	0,26	0,425	10,085	0,32



4	0,26	0,425	09,598	0,21
5	0,27	0,417	08,927	0,35

Tableau 5- Résultat des essais relatifs au type C

N°	a /w	Ø	BWØ (mm <sup>2</sup> )	U (J)
1	0,36	0,345	7,003	0,40
2	0,32	0,340	8,024	0,39
3	0,43	0,288	5,627	0,32
4	0,38	0,322	7,022	0,36
5	0,29	0,400	9,45	0,43
6	0,28	0,408	8,75	0,41
7	0,43	0,306	6,81	0,33
8	0,32	0,378	6,929	0,34

La dispersion observée sur les résultats des essais est très importante. Elle est due essentiellement à la nature hétérogène du matériau composite, aussi, la présence de défauts au sein du matériau introduits pendant son élaboration tels que les porosités de surface et intérieures, figure 5. Il faut aussi signaler que le nombre d'éprouvettes limité ainsi que l'effet géométrique des différences d'épaisseur des éprouvettes ont contribué aussi à amplifier le phénomène de dispersion.



Figure 5: Porosité de surface et intérieure



Ces résultats ont permis de tracer les points représentés sur les figures 6, 7 et 8 pour chaque type d'entaille : SEN, B et C.

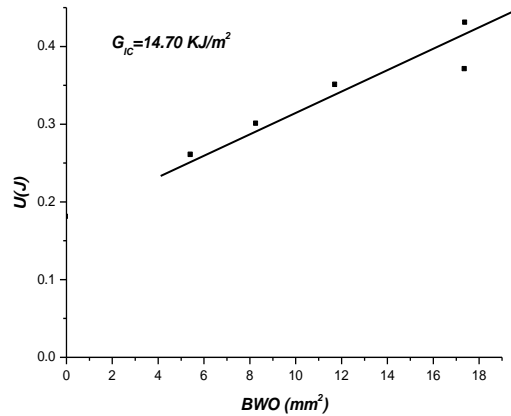


Figure 6: Variation de l'énergie en fonction de BWO Type SEN

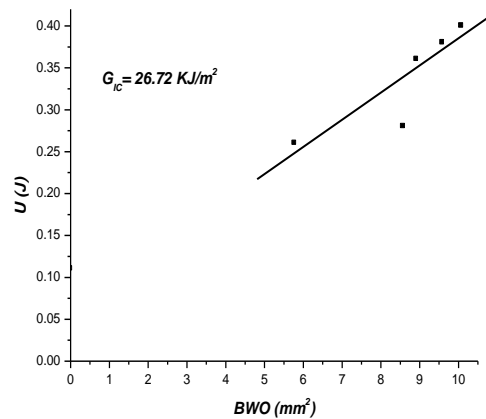


Figure 7: Variation de l'énergie en fonction de BWO Type B

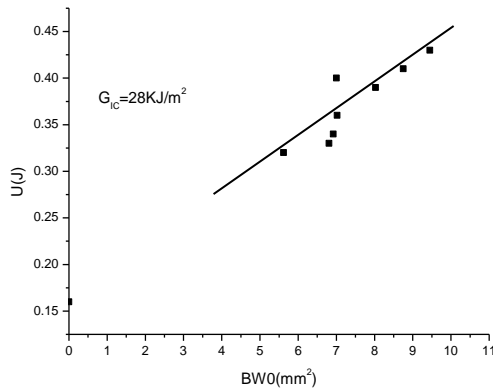


Figure 8: Variation de l'énergie en fonction de BWØ Type C

Les figures 6, 7, 8, montrent une proportionnalité entre l'énergie totale perdue par le marteau et la surface rompue. Le point de contact de la droite de régression avec l'axe des énergies correspond à une énergie positive qui fait partie de l'énergie totale mesurée. Cette énergie qui contribue d'une manière significative à la rupture correspond à l'énergie cinétique de l'éprouvette [9]. L'expression de l'énergie totale U devient :

$$U = G_C \cdot B \cdot W \cdot \varnothing + U_C \quad (2)$$

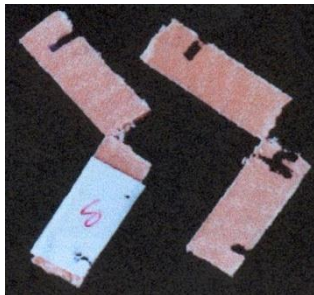
L'augmentation de l'énergie total de la rupture avec l'augmentation des surfaces rompues se traduit par le fait que la rupture est un phénomène consommateur d'énergie et donc l'augmentation des surfaces rompues nécessite une énergie plus importante. La pente de la courbe U (BWØ) permet de déterminer l'énergie critique de rupture où force d'extension de la fissure en mode I notée  $G_{IC}$ . Le tableau 6 compare les valeurs de  $G_{IC}$  pour chaque type d'entaille.

Type	SEN	B	C
$G_{IC}$ Kj/m <sup>2</sup>	14.70	26.72	28

Tableau 6: Comparaison des valeurs de  $G_{IC}$

Notons que la valeur de  $G_{IC}$  pour le type SEN est relativement inférieure à celle du type B et C qui sont relativement proche.

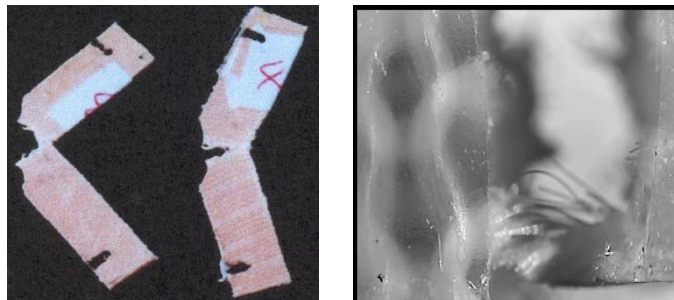
Les éprouvettes présentent un endommagement spécifique vu la nature des constituants du composite.



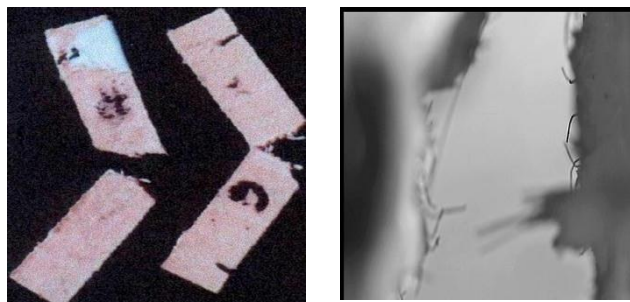




(a) Type SEN



(b) Type B



(c) Type C

Figure 9.: Morphologie de rupture des éprouvettes

Les observations visuelles montrent que les éprouvettes présentes dans l'axe de l'application de la charge. Les zones endommagées se caractérisent par le déchaussement fibres, plus important pour verre que pour le perlon.

#### 4 Conclusion

L'utilisation des principes de la mécanique de la rupture a permis de mesurer sur des éprouvettes entaillées, l'énergie de rupture correspondant à des éprouvettes munies de 3 types d'entailles. Les valeurs trouvées représentent une caractéristique intrinsèque du matériau, et présentent une dispersion qui est due à la nature du matériau, à la présence de défauts et aux conditions d'essai.



L'analyse morphologique ainsi que les observations visuelles des ruines ont révélées le cas du déchaussement des fibres des renforts, Plus important dans le cas des fibres de verre.

## Bibliographie

- [1] : B. DERIQUETIEN, "Analyse de défaillance pièces plastiques et composites : Recueil de conférences", Edition CETIM, 2e rencontre, Nantes, 29 -30 Octobre 1996.
- [2] : L. LABET, J. BREARD, S. PILLUT-LESAYRE, G. BOUQUET, " Détermination des paramètres d'injection pour minimiser les vides dans des pièces composites ", XVe Congrès français de mécanique, Nancy, 2001.
- [3] : M. BENAMIRA " Caractérisation à la rupture du matériau composite utilisé par l'ONAAPH ", mémoire de Magister, Dpt Génie Mécanique, Univers. de Annaba, Mars 2003
- [4] : A. EHRLACHER, A. CHABOT, " Initiation du délaminage dans les matériaux composites ", INRIA Rocquencourt. 21 – 23. septembre 1998.
- [5] : J. REBIERÉ, M. N. MAATALLAH, " Evolution des différents modes d'endommagements dans les stratifiés croisés ", XVe Congrès français de mécanique, Nancy, 2001.
- [6] : A. BEZAZI, A. EL MAHI, J. M. BERTHELOT, B. BEZAZI, " Analyse de l'endommagement des stratifiés en flexion 3- points influence de la séquence d'empilement ", XVe Congrès français de mécanique, Nancy, 2001.
- [7] : D. RIZI, "Etude de la ténacité en choc et à faible vitesse de sollicitation des matériaux composites" mémoire de magistère génie civile, option matériau, université de Annaba. 1994
- [8] : G.P MARSHALL, " the effect of rate on the impact fracture toughness of polymer ", international journal of fracture. 1973
- [9]: G.P MARSHALL, J.G.WILLIAMS, "The effect of rate on the impact fracture toughness of polymers", international journal of fracture, N14. PP 69 – 83 , 1973.