

## TENACITE DYNAMIQUE EN FLEXION 3 POINTS DE MATERIAUX COMPOSITES BIDIRECTIONNELS JUTE - POLYESTER

<sup>1</sup>D. DJEGHADER, <sup>2</sup>B. REDJEL

<sup>1</sup>Département de Génie Civil, Université Mohamed Seddik Benyahia,  
18 000 Jijel - Algérie

<sup>2</sup>Laboratoire de Génie Civil, Département de Génie Civil, Université Badji Mokhtar,  
BP 12, 23 000 Annaba - Algérie

Reçu le 24 Décembre 2014 – Accepté le 10 Décembre 2015

### Résumé

Des essais de choc réalisés en flexion trois points sur des séries d'éprouvettes prismatiques entaillées d'un matériau composite bidirectionnel jute-polyester ont permis d'obtenir une estimation de la ténacité dynamique  $G_{IC}$  en appliquant les principes de la mécanique linéaire élastique de la rupture.

Une dispersion importante des points expérimentaux autour des droites de régression linéaire caractérise les résultats de mesure interprétés par la méthode de J.G. Williams et ce pour les 3 distances entre appuis expérimentés.

Cette dispersion caractéristique de ces matériaux est la conséquence de l'hétérogénéité des composites sur le chemin de la fissuration ainsi que de la dispersion de l'essai mécanique lui-même. La résistance à la fissuration calculée en choc diminue avec l'augmentation de la distance entre appuis.

**Mots clés :** Choc, ténacité, jute, dispersion, polyester.

### Abstract

The concepts of linear elastic fracture mechanics have been applied to analyse and to obtain an estimation of the dynamic fracture toughness  $G_{IC}$  using the three point bend impact test carried out on a serie of notched specimens of bidirectional jute polyester composite material.

The scatter of the results of experimental points around the linear regression line interpreted by J. G. Williams method is important and significant for the three experienced distances between supports.

This scatter which represents a characteristic of these materials is the result of the composite heterogeneity in the way of crack growth and the dispersion of the mechanical test itself. The crack resistance calculated in impact test decreases with increase of the distance between supports.

**Keywords:** Impact ; fracture toughness ; jute ; scatter, polyester.

### ملخص

اختبارات الصدمات التي أجريت باستعمال تجربة الانحناء بثلاث نقاط على سلسلة من العينات من المادة المركبة من البوليستر و الجوت التي تحتوي على شق قد أسفرت عن تقدير صلابة ديناميكية (مقاومة الانشقاق)  $G_{IC}$  من خلال تطبيق مبادئ ميكانيك الكسر الخطي المرن.

تشنتت كبير من النقاط التجريبية حول خطوط الانحدار الخطي يميز نتائج القياس باستعمال طريقة J.G. Williams (وليامز) وهذا الثلاث المسافات المختلفة المستعملة بين الدعامات.

هذا التشنتت في النتيجة ناتج أساسا عن عدم تجانس المواد المركبة على مسار التصدع وتشنتت الاختبار الميكانيكي نفسه. نتائج المقاومة المحسوبة للصدمات في انخفاض مع زيادة المسافة بين الدعامات.

**الكلمات المفتاحية :** الصدمة، مقاومة الانشقاق، الجوت، التشنتت، البوليسثير

Les matériaux composites à matrice de polymères renforcés de fibres naturelles font l'objet de plus en plus d'attention de la part de diverses industries. Ils se combinent de bonnes propriétés mécaniques avec une masse spécifique faible et peuvent représenter une alternative à ceux à base de fibres céramiques utilisés dans certaines applications techniques ou à ceux renforcés de fibre de verre dans de nombreuses applications ne nécessitant pas de chargements forts [1]. Cependant, ce type de renfort offre de mauvaises compatibilités avec quelques matières plastiques ainsi qu'une adhérence souvent insuffisante entre les fibres non traitées et la matrice polymère ce qui peut conduire à un décollement avec le temps [2,3].

Les fibres de jute sont parmi les meilleures fibres naturelles utilisées actuellement dans l'industrie des matériaux composites de grande diffusion en raison de leurs propriétés et de leur disponibilité. L'utilisation de ces fibres qui ont l'avantage d'être faciles à tisser comme renforts dans des thermoplastiques comme le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP) et les thermodurcissables comme le polyester insaturé et la résine époxyde a fait l'objet de nombreuses études intéressantes [4]. Ces fibres possèdent des propriétés spécifiques élevées, un comportement moins abrasif pour le matériel de traitement et une bonne stabilité dimensionnelle. De nombreux travaux ont été publiés ces dernières années concernant l'élaboration et la caractérisation en chargement statique et en fatigue des matériaux composites à fibres végétales ou bio fibres. Cependant, leur comportement en choc reste peu étudié [5,6,7]. C. Amanda et L.A.H. Torrões [8] montrent que l'incorporation du tissu de jute dans la résine de polyéthylène change complètement les caractéristiques à la rupture de ces matériaux et augmente leur résistance à l'impact. A.K. Rana et al [9] montrent qu'il y a une augmentation de l'énergie de choc d'un matériau composite à matrice polypropylène renforcée de fibres de jute courtes avec l'augmentation du pourcentage des fibres de jute.

Cette augmentation de la résistance au choc n'est plus significative au delà d'un taux de 50%. P. Wambua et al [10] examinant et comparant les propriétés mécaniques de différents matériaux composites à matrice polypropylène renforcée par des fibres naturelles comme le sisal, le kénaf, le chanvre, le jute et les fibres de coco, montrent que ces derniers affichent une faible résistance aux chocs. Une autre comparaison a été faite avec les propriétés correspondantes des matériaux composites à matrice de polypropylène renforcée par des nattes de verre. Les composites de fibres naturelles examinés montrent une faible résistance aux chocs contrairement aux composites à fibres de chanvre et de sisal qui affichent une résistance comparable à celle des matériaux composites renforcés de fibres de verre.

Les propriétés spécifiques des matériaux composites à fibres naturelles sont parfois meilleures que celles des matériaux composites à fibres de verre. S. Achouri et B. Redjel [11] utilisant les concepts de la mécanique de la rupture pour caractériser en choc des matériaux composites verre-perlon-polyester à usage orthopédique et verre-carbone-polyester montrent que l'essai de choc est très

dispersif dans ses résultats mais reste un moyen rapide d'évaluation des paramètres de ténacité des matériaux composites de grande diffusion pour leur classification. Ainsi, le composite carbone-perlon-polyester possède une meilleure résistance à la fissuration en sollicitation dynamique que le composite verre-perlon-polyester.

L'objectif de ce travail est d'analyser et d'interpréter les résultats des essais de choc effectués sur des éprouvettes entaillées d'un matériau composite bidirectionnel jute-polyester en utilisant la méthode de J.G. Williams basée sur les principes de la mécanique linéaire élastique de la rupture.

## 1. PROTOCOL EXPERIMENTAL

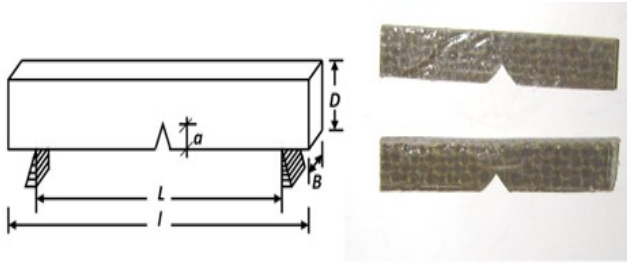
Le matériau utilisé dans cette étude est un composite à matrice polyester renforcé par trois couches de fibre de jute bidirectionnel et fabriqué par la méthode de moulage au contact avec un pourcentage de gelcoat comme durcisseur compris entre 0,1% et 0,2%. Ce procédé qui représente la plus ancienne méthode de mise en oeuvre des composites permet surtout la réalisation de pièces de petites séries.

Le moule enduit de l'agent de démoulage reçoit la couche de surface puis le renfort sous forme de tissu de jute imprégné manuellement de la résine polyester jusqu'à l'obtention de l'épaisseur désirée qui est dans notre cas en moyenne de 4 mm. La polymérisation est faite à la température ambiante. Après durcissement de la résine la plaque est ainsi démoulée.

Les éprouvettes utilisées en choc sont de forme prismatique, de largeur 10 mm et d'épaisseur  $4 \pm 0,5$  mm avec une fraction volumique de 40% de fibres de jute en moyenne, à entaille latérale de type SEN (single edge notch). Les dimensions des éprouvettes sont mesurées avec précision à l'aide d'un pied à coulisse.

Trois distances entre appuis de 40 mm, 60 mm et 70 mm fixes sont imposées par les dispositifs de l'appareil de choc. Ainsi trois longueurs d'éprouvettes qui leur sont correspondantes respectivement de 50 mm, 70 mm et 80 mm ont été expérimentées. La norme NFT EN ISO 179-1 recommande pour ce type de plaques des éprouvettes de 80 mm de longueur avec des entre appuis de 62 mm. Cependant la limitation des entre appuis fixés par le montage utilisé nous a imposé les 3 géométries testées. Toutes ces approches ont été faites afin de respecter les rapports L/D utilisés par J.G. Williams pour tabuler le facteur de forme  $\phi$ .

Ces éprouvettes ont été découpées sur des plaques de  $300 \times 210$  mm<sup>2</sup> puis entaillées au milieu, à des profondeurs différentes comme illustré sur la figure 1. Un pré entaillage est d'abord effectué à l'aide d'une scie spéciale diamantée puis l'entaillage est continué dans un dispositif utilisant une lame rigide chirurgicale afin d'avoir une forme très aigüe du fond de fissure contrôlé par un microscope. Le rayon à fond d'entaille est d'environ 0,1 mm. Les longueurs d'entailles sont toutes comprises dans le rapport  $0,2 < a/D < 0,6$ . a et D sont respectivement la longueur d'entaille et la largeur de l'éprouvette.



**Figure 1 :** Eprouvette utilisée en choc

Les essais ont été effectués sur une machine de choc mouton pendule Charpy de type Zwick 5113 en flexion 3 points. L'angle de déclenchement de l'appareil est de 160° et la vitesse d'impact est de 3,85 m/s. Le pendule utilisée dans le cas des matériaux de l'étude est dotée d'une énergie de 7,5 joules. La figure 2 montre le dispositif expérimental utilisé ainsi que le dispositif d'acquisition et de traitement des données par un microordinateur doté d'un logiciel „test expert”.



**Figure 2 :** Machine de choc Charpy type Zwick/Roell utilisée

La méthode de Williams basée sur les principes de la mécanique linéaire élastique de la rupture a été utilisée pour interpréter les résultats des essais de choc obtenus sur les éprouvettes entaillées [12, 13, 14]. Cette méthode permet d'obtenir une estimation de l'énergie de rupture ou ténacité  $G_{IC}$  paramètre intrinsèque du matériau à partir de l'énergie totale dissipée  $U$  lors du choc selon l'équation :  $U = G_{IC} \cdot B \cdot D \cdot \phi$ .

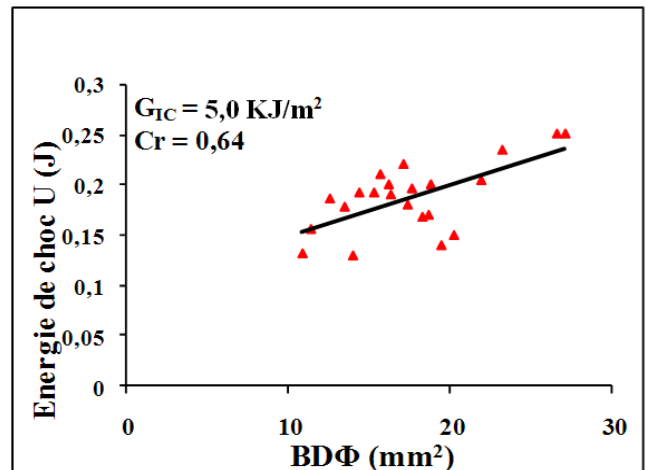
$B$  et  $D$  sont respectivement l'épaisseur et la largeur de l'éprouvette et  $\phi$  est un facteur de calibration qui dépend de la géométrie de l'éprouvette et qui a été tabulé par J.G. Williams pour différents longueurs d'entailles et pour différents rapports  $L/D$  [15].

Ainsi l'enregistrement de l'énergie perdue par le marteau au moment de l'impact pour chaque entaille porté sur un diagramme  $U = f(BD\phi)$  est une droite dont la pente donne une valeur estimée de mesure de  $G_{IC}$  [12-15].

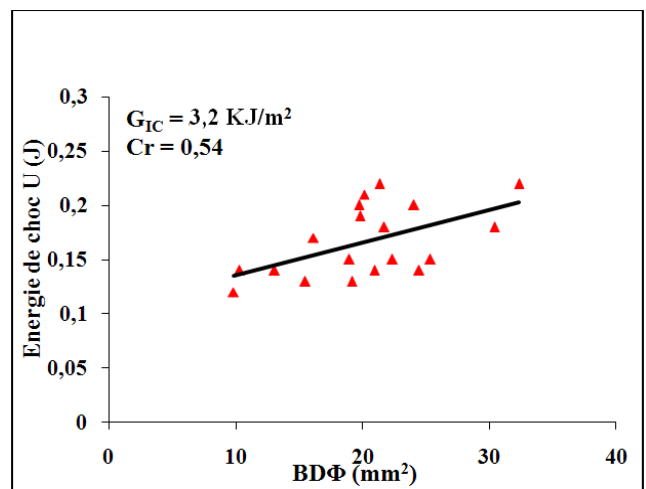
Il faut signaler que malgré l'intérêt de cette méthode très rapide et toujours utilisée à des fins de comparaison ou de classification des matériaux en fonction de leur énergie de rupture, il est possible d'aller encore plus loin dans l'interprétation des mécanismes de comportement dynamique des matériaux composites en utilisant l'instrumentation et l'accès à la courbe charge-temps lors de l'impact. En effet la méthode de J.G. Williams faut-il le signaler avec l'impact instrumenté a beaucoup progressée en termes de méthodes d'analyse depuis 1975 [17].

## 2. RESULTATS, ANALYSE ET DISCUSSION

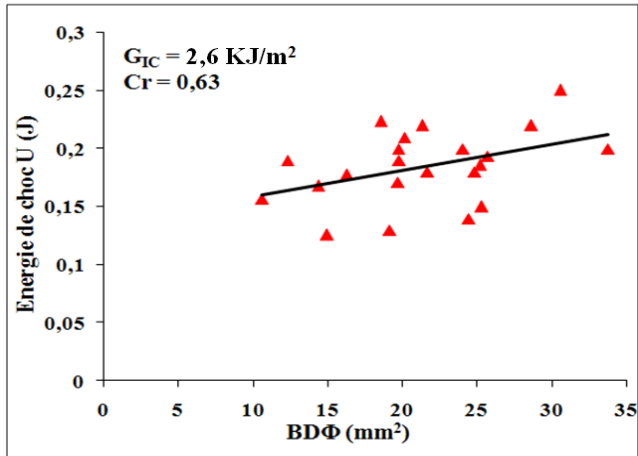
Les représentations graphiques des points de mesure de l'énergie de rupture totale perdue par le marteau  $U$  en fonction des surfaces des fissures rompues pour les trois distances entre appuis utilisées sont représentées sur les figures. 3, 4 et 5.



**Figure 3 :** Energie de rupture totale  $U$  en fonction des surfaces rompues  $BD\phi$  ( $L=40\text{mm}$ )



**Figure 4 :** Energie de rupture totale  $U$  en fonction des surfaces rompues  $BD\phi$  ( $L=60\text{mm}$ )



**Figure 5 :** Energie de rupture totale U en fonction des surfaces rompues  $BD\phi$  ( $L=70\text{mm}$ )

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de l'énergie totale de rupture avec l'augmentation des surfaces rompues se traduit par le fait que la rupture est un phénomène consommateur d'énergie. Ainsi, l'augmentation des surfaces rompues nécessite une énergie de rupture plus importante.

La dispersion des points expérimentaux autour des droites de régression linéaire est importante pour tous les cas testés comme l'indiquent les coefficients de corrélation calculés et qui sont faibles.

En effet, les régressions linéaires établies sur les points expérimentaux pour les distances entre appuis de 40mm, 60mm et 70 mm sont données avec des coefficients de corrélation largement inférieurs à 1, traduisant les écarts assez importants de ces points expérimentaux autour des droites de régression.

Cette forte dispersion est une caractéristique des matériaux hétérogènes et est la conséquence surtout de l'hétérogénéité du matériau sur le chemin de la fissuration, du mode de fabrication des éprouvettes et des entailles ainsi que de la dispersion de l'essai mécanique lui-même. La présence des défauts de différentes natures et géométries lors de la fabrication des éprouvettes est aussi un paramètre favorisant la variabilité de la mesure.

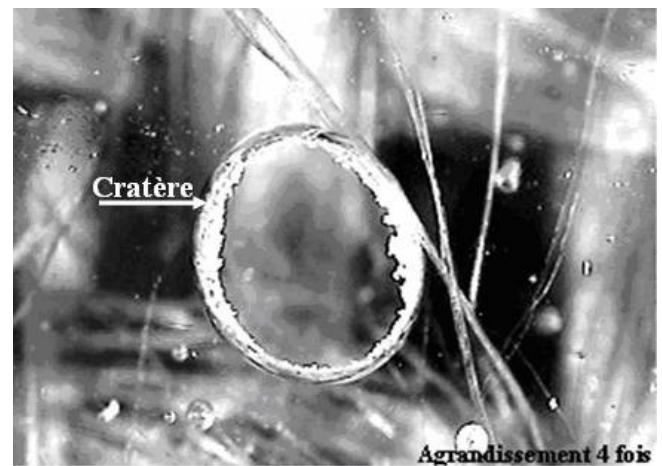


**Figure 6 :** Exemple d'éprouvette endommagée en choc

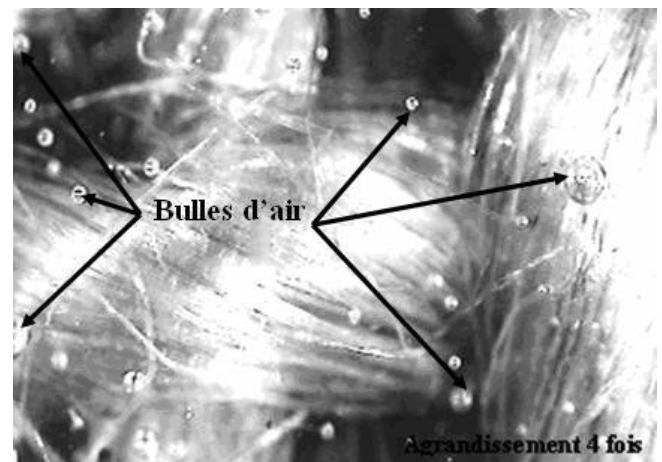
En effet, la distribution du taux de fibres de jute dans la matrice polyester ainsi que leur orientation n'est pas uniforme au sein du volume du matériau, ce qui provoque des chemins de rupture souvent tortueux qui ne suivent pas forcément la direction et le plan de l'entaille initiale et qui sont différents d'une éprouvette à une autre. La figure 6 montre un exemple d'une éprouvette rompue en choc.

Les fissurations de éprouvettes sont souvent différentes selon l'orientation des fibres près du fond d'entaille. La fissure semble relier un grand nombre d'hétérogénéité peu fréquent sur le reste de la surface ce qui induit une nature différente du processus de rupture durant la propagation. Par ailleurs, il faut signaler que les procédés de mise en œuvre jouent aussi un rôle très important sur les propriétés mécaniques des matériaux composites qu'ils influencent [16]. Le composite jute – polyester de cette étude a été fabriqué manuellement à l'aide du procédé de contact avec un simple outillage ce qui induit par conséquent de nombreux défauts aléatoirement distribués au sein du volume de l'échantillon.

Des observations microscopiques révèlent la présence de cratères et de bulles d'air dans de nombreux endroits et espaces à l'intérieur du volume des éprouvettes ainsi que des vides comme illustré sur les images des figures 7 et 8.



**Figure 7 :** Composite bidirectionnel jute-polyester : présence d'un cratère



**Figure 8 :** Présence de bulles d'air

Ces défauts qui influent directement le comportement du matériau lors du service contribuent de façon significative à la variabilité constatée sur les mesures de l'énergie de rupture. Par ailleurs l'usinage de l'entaille très difficile à réaliser ainsi que la difficulté de réalisation d'un fond d'entaille conforme à la norme accentuent le phénomène de dispersion.

Un autre problème lié au matériau à savoir l'absence totale d'un traitement chimique approprié des fibres de jute peut aussi avoir des conséquences sur ce phénomène important de la dispersion des résultats relevés ainsi que sur les médiocres propriétés des valeurs de ténacité mesurées en choc. Il est fort probable que l'utilisation des fibres de jute à l'état brut sans aucun traitement chimique de leur surface pour éliminer toutes les matières contrariant une bonne adhérence avec la matrice engendre ainsi une interface fibre-résine très faible. Les résultats de mesure de la ténacité dynamique en fonction de la distance entre appuis en flexion trois points sont illustrés sur l'histogramme de la figure 9 pour l'ensemble des éprouvettes testées.

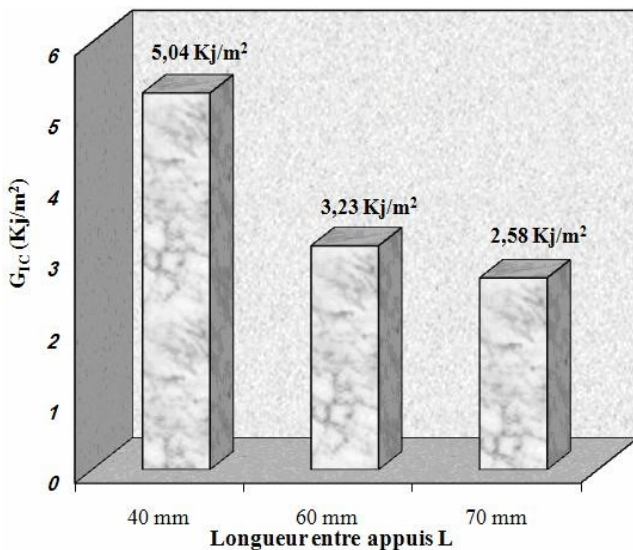


Figure 9 : Ténacité  $G_{IC}$  en fonction de la distance entre appuis L

Ces résultats montrent que l'effet de la distance entre appuis pour les matériaux à fibres de jute est important comparativement à celui observé sur d'autres matériaux composites comme le polyester-verre à titre d'exemple. En effet la ténacité en choc  $G_{IC}$  mesurée par la méthode de Williams diminue avec l'augmentation de la distance entre appuis. Cette variabilité surprenante peut être liée en partie au problème de la normalisation des éprouvettes par rapport aux entre appuis fixes imposés par le dispositif du montage Zwick utilisé.

Il est à signaler que la ténacité en choc des matériaux composites jute-polyester reste très inférieure par rapport à celle mesurée sur des matériaux composites verre-polyester de grande diffusion. L'exemple de la figure 10 tiré de la littérature est très illustratif de la différence par rapport à un composite verre-polyester multidirectionnel renforcé de fibres de verre courtes orientées au hasard. Le rapport est d'environ 1/45.

### CONCLUSION

Les éprouvettes testées de matériau composite jute/polyester se sont rompues de façon fragile en choc.

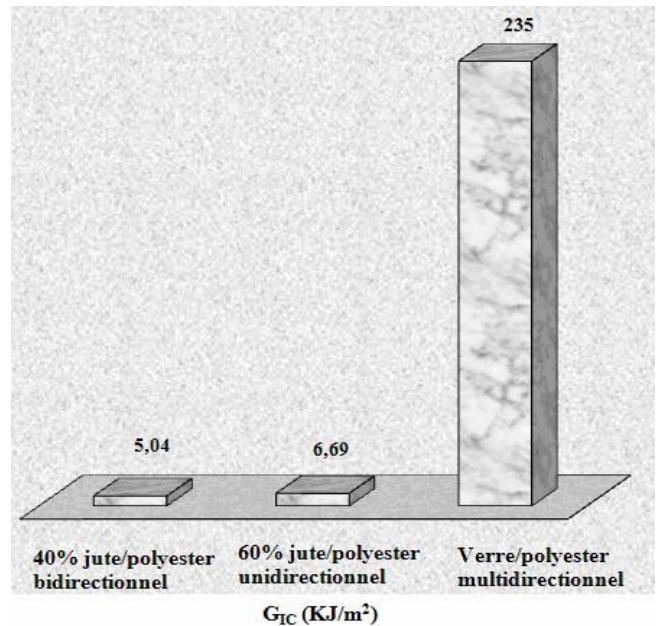


Figure 10 : Comparaison de la ténacité en choc en fonction de la nature du renfort

La mesure de l'énergie critique de rupture  $G_{IC}$  obtenue en choc sur les matériaux composites bidirectionnels jute-polyester en utilisant le mouton pendule et déterminée par la méthode classique de J. G. Williams se caractérise par une forte dispersion.

Celle-ci est essentiellement due à l'hétérogénéité du matériau, au processus de fabrication par le procédé de contact qui induit des défauts comme les vides et les bulles d'air difficiles à éliminer ainsi qu'à la difficulté d'usinage de fin d'entaille parfait. La ténacité dynamique en choc des matériaux composites jute-polyester montre une tendance à la diminution avec l'augmentation de la distance entre appuis en flexion trois points. Cette ténacité reste très faible par rapport à celle habituellement mesurée sur les composites verre-polyester.

### REFERENCES

- [1] Santulli C. (2003). In: *Proceedings of the International School on Advanced Material Science and Technology*, August 26th-29th – Jesi – Ancona –Italy.
- [2] Ku Wang H., Pattarachaiyakop N., Trada M. (2011), *Comp. : Part B* **42**, 856–73.
- [3] Malkapuram R., Kumar V., Negi Y.S. (2009) *J. of Reinf. Plast Comp.* **28**, 1169–89.
- [4] Mohanty A.K., Misra M. (1995) *Polym-Plast Technol Eng.* **34** (5), 729-92.
- [5] Sangthong S., Pongprayoon T., Yanumet N. (2009), *Comp.: Part A* **40**, 687-694.
- [6] Silva F.A., Barzin M., Filhoc R.D.T. (2010), *J. Mat. Sci. and Eng. A* **527**, 5507-13
- [7] Athijayamania A., Thiruchitrambalamb M., Natarajana U., Pazhanivel B. (2009) *J. of Mat. Sci. and Eng. A*, **517**, 344-353.
- [8] Amanda C., Torrones L.A.H. (2007), *Acta Microscopica* **16**, N°1-2.
- [9] Rana A.K., Mandal A., Mitra L.B.C., Jacobson R., Rowell R. (1998), *J. of Appli. Polym. Sci.* **69**, 329-338.