

MODELISATION DE L'ENDOMMAGEMENT INDUIT PAR CHOC SUR COMPOSITE VERRE / POLYESTER SOUS DIFFERENTES ENERGIES D'IMPACT

Reçu le 25/06/2007 – Accepté le 28/05/2008

Résumé

L'évolution de la forme conique du volume endommagé vers une forme quelconque en fonction du niveau de l'énergie d'impact a été analysée en réalisant des essais d'impacts et post-impacts sur des plaques en composite verre E/polyester. Il a été relevé que le volume endommagé perd sa forme initialement conique à un seuil de 65% de l'énergie de défaillance totale (énergie de rupture) de la plaque à une vitesse d'impact égale à 5.5m/s. Au-delà de 85% de l'énergie de défaillance, la forme de la zone endommagée devient de plus en plus allongée dans la direction de la largeur, direction de propagation de fissures. Cette propagation accélère la perte de résistance et fait décroître sensiblement la rigidité résiduelle des plaques impactées.

Mots clés : Fluage, comportement différé, paramètres, essais, fissuration, module d'élasticité, caractérisation.

Abstract

The objective of this experimental study is to obtain a detailed understanding of the damaged volume evolution from conical volume shape to a quite some form of glass/polyester thick laminates under drop-weight impact loading conditions. Experimental impact tests are performed under increasing impact energy and post-impact tests are carried out to evaluate the residual strength and stiffness of laminates. The results obtained show that the damaged volume loses its original conical form at a threshold of 65% of total failure energy corresponding to 5.5m/s impact velocity. Beyond 85% of total failure energy, the shape of damaged zone becomes more and more elongated in width direction; which corresponds to crack propagation direction. This crack propagation accelerates the loss of strength and significantly decreases the residual stiffness of the impacted plates.

Keywords: Damage, Impact, Delamination, Inter Lamina Shear Strength

R. LEHELAH¹,
K. AZOUAOU¹,
T. BOUKHAROUBA¹,
M. NAIT-ABDELAZIZ²

¹Laboratoire de Mécanique Avancée (LMA), Faculté de GM&GP de l'USTHB BP 32, El-Alia, Bab-Ezzouar 16111 Alger – Algeria

²Laboratoire de Mécanique de Lille, UMR CNRS 8107, Ecole Polytech Lille Av. Paul Langevin 59655, Villeneuve d'Ascq, France

ملخص

تم في هذا البحث دراسة عملية تطور الشكل المخروطي للتلف الناتج عن الصدم المطبق على صفائح من مركبات الألياف الزجاجية (E/polyester) وهذا حسب تزايد طاقة الصدم. تبين أن شكل التلف يفقد مخروطيته الابتدائية في عتبة 65 % من طاقة الإنهيار الكلي للصدم بسرعة 5,5 م/ثا، و عند يتجاوز 85 % من طاقة الإنهيار الكلي للصدم، شكل التلف في الصفيحة يتسع عرضيا (إتجاه إنتشار الصدم)، هذا الإنتشار يسارع في ضياع مقاومة الصفيحة مما يفقدها المتانة المتبقية.

الكلمات المفتاحية : التلف، الصدم، تنصل الشرائح، مقاومة القص ما بين الشرائح.

Les matériaux composites sont utilisés dans un grand nombre d'applications industrielles (aéronautique, automobile et marine). Dans le domaine de la fabrication navale, par exemple, ces applications font appel essentiellement à l'aptitude de ces matériaux à résister aux chocs, à leurs propriétés mécaniques remarquables ainsi qu'à l'allègement et la facilité de mise en forme de la structure fabriquée. Les structures navales sont régulièrement soumises à des impacts accidentels lors de navigation ou pendant l'accostage et même lors de la maintenance ou de la manutention. Dans le cas des plaques composites soumises aux chocs, il est établi que c'est l'accumulation des dommages (délaminage, rupture matricielle et rupture de fibres principalement) suites à des chocs multiples qui cause la défaillance de la structure. Plus de 70% des recherches effectuées dans le domaine des composites impactés portent sur le comportement post-impact, en réalisant des essais de flexion, de cisaillement et voire de compression [1-4].

Wyrick et Adams [1] ont réalisés des essais de chocs répétés sur un dispositif de poids tombant, afin de déterminer par des essais de traction et de compression post-impacts l'influence de l'énergie et le nombre d'impacts sur la résistance résiduelle d'un composite en carbone/époxy. Ces auteurs, ont constatés que l'endommagement résultant d'un nombre d'impacts inférieur à 100, pour un niveau d'énergie d'impact n'excédant pas 3 Joules est sans effet sur la résistance résiduelle. L'endommagement commence à se manifester à partir de 10 Joules, et la plaque composite peut être totalement endommagée (perforée) au bout du 10^{ième} impact sous une énergie de 30 Joules. Une autre approche similaire a été développée par Dotst et al. [2] afin de mettre en évidence l'influence de l'empilement des plis sur la résistance résiduelle d'un composite. Les auteurs ont réalisés des essais de chocs sur des composites en verre/époxy de différentes stratifications. L'impact au centre de la plaque est obtenu par la chute libre de différentes hauteurs d'une sphère en acier de 15,9 mm de diamètre et de 5,44 kg de masse. Les surfaces endommagées suivant l'épaisseur sont mises en évidence en utilisant la méthode de pénétration d'un liquide fluorescent. Ceci a permis de mesurer la taille du dommage et sa répartition par couche. Par la suite, la résistance résiduelle est déterminée par des essais post-impacts de compression sur des éprouvettes découpées dans les plaques impactées. Ces essais ont permis de relier respectivement l'énergie d'impact à la taille de la surface endommagée et à la résistance résiduelle en compression. Les auteurs concluent que la perte de résistance résiduelle n'est pas significative pour les faibles énergies. Cette tendance est complètement renversée à partir du niveau 7 Joules où

on assiste à une chute importante de la résistance jusqu'à la défaillance (rupture) totale de la plaque.

Le comportement à l'impact et caractéristiques en compression post-impact de composites hybrides verre-carbone/époxy avec différentes séquences d'empilement ont fait l'objet des travaux de Naik et al. [3]. Une armure en toile de verre E et un tissage sergé de carbone T-300 ont été utilisés comme matériaux de renforcement. À titre de comparaison, des stratifiés contenant uniquement des fibres de carbone et uniquement des fibres de verre ont également été étudiés. Les essais d'impact ont été réalisés sur une machine instrumentée de poids tombant et des essais post-impact de compression ont été menés afin de mesurer la résistance résiduelle en compression. Il a été constaté que les composites hybrides sont moins sensibles aux entailles en comparaison aux stratifiés 100% fibres de carbone ou 100% fibres de verre.

De même Belingardi et al. [4] se sont intéressés à la caractérisation des matériaux composites destinés à la construction de pièces de structure dissipatives d'énergie cinétique lors des impacts. En particulier des stratifiés à fibres de verre et matrice époxy sont pris en compte. Des essais d'impact sont effectués selon les normes ASTM en utilisant une machine de poids tombant. Guillaumat [5] a conduit une campagne d'essais d'impact en utilisant différentes masses et différentes vitesses d'impact sur des plaques de 1m² en matériau composite verre/époxy empilées selon la séquence [0, 90]_{3s} et simplement appuyées sur deux cylindres. Les essais ont été réalisés sur un dispositif de poids tombant instrumenté par un accéléromètre et un capteur de force. A l'issue de cette étude, l'auteur conclut que le déplacement au centre (flèche) et le temps de contact augmentent avec la distance entre appuis et inversement la force de contact impacteur-structure diminue.

Dans ce travail on s'est intéressé au comportement à l'impact et aux caractéristiques de flexion et de cisaillement post-impact d'un composite à base de résine polyester renforcée de fibres de verre-E (mat). Une analyse purement expérimentale a été effectuée sur un dispositif de poids tombant, conçu est réalisé au sein de notre laboratoire. La rigidité et la résistance résiduelles à la flexion et au cisaillement ont été mesurées sur des éprouvettes normalisées prélevées sur les plaques impactées. Les résultats d'essais nous ont permis d'analyser directement sur les éprouvettes endommagées l'évolution du dommage en fonction de l'énergie d'impact et à partir des tracés de courbes la variation de la :

- contrainte résiduelle en fonction du pourcentage de l'énergie d'impact à rupture,
- rigidité résiduelle en fonction de l'énergie d'impact.

1. PROTOCOLE D'ESSAIS

Le matériau étudié est un stratifié verre E/polyester en forme de plaque, constituée de cinq couches de mat à fils enchevêtrés. Ce matériau rentre dans la fabrication des barques de pêche et bateaux de plaisance ainsi que dans les panneaux et les plateformes d'isolation fabriqués par la société algérienne ENPC de Chlef. Le procédé de fabrication est manuel, en utilisant un moule de la forme d'une plaque de dimension $1800 \times 1200 \times 8 \text{ mm}^3$, à température ambiante et sans application d'un effort de pression. Deux types d'essais ont été conduits au niveau du Laboratoire de Mécanique Avancée de l'USTHB ; essais d'impact et essais post-impact (essais de flexion et de cisaillement).

1.1 Essais de chocs

Les essais de chocs ont été menés sur un dispositif de poids tombant fabriqué par nos propres soins. Ces essais consistent à encastrer une plaque de dimension $160 \times 80 \times 8 \text{ mm}^3$ et lui faire subir un chargement de choc en son milieu par un impacteur à tête hémisphérique de rayon 6mm. Les plaques ont été testées à six niveaux d'énergie d'impact sous la même vitesse de 5,5m/s.

1.2 Essais post-impact

Une fois les essais d'impact effectués, une série d'essais post-impact de flexion et de cisaillement ont été menés sur des éprouvettes découpées dans les plaques impactées. Ces essais sur composite sont largement utilisés dans les milieux industriels en raison de leur simplicité est font l'objet des normes EN ISO 14125.

Tableau 1 : Dimensions des éprouvettes post-impact de flexion et de cisaillement en concordance avec la norme EN ISO 14125

Essais	longueur totale L [mm]	distance entre appuis l [mm]	largeur b [mm]	Epaisseur h [mm]
Flexion pure	160	150	30	8
Cisaillement quasi-pur	35	25	30	8

Dans le cas de la flexion trois points, le rapport de la contrainte normale à la contrainte de cisaillement est gouverné par l'élanement de l'éprouvette (rapport de la distance entre appuis à l'épaisseur). Les essais de flexion trois points (essai post-impact) ont été conduits sur des barreaux rectangulaires découpés directement dans les plaques impactées, (tableau 1 et figure 1).

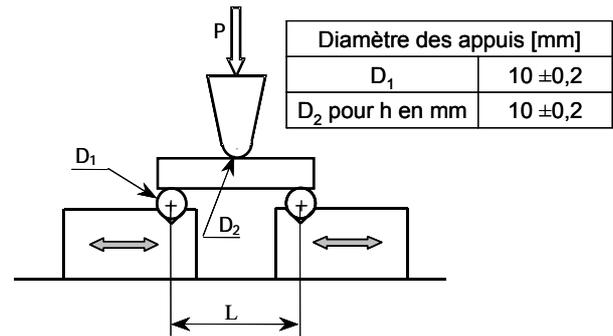


Figure 1 : Dispositif de flexion trois points

Pour ces conditions, la théorie des poutres permet d'exprimer :

- la contrainte normale de flexion :

$$\sigma_f = \pm \frac{3Pl}{2bh^2} \quad (1)$$

- la contrainte de cisaillement :

$$\tau_{13} = \frac{3P}{4bh} \quad (2)$$

1.2.1 Essais de cisaillement plan inter laminaire

Ce type d'essais est très important pour les matériaux composites, réputés par leur très grande sensibilité aux contraintes de cisaillement. Les essais de cisaillement pur sont difficiles à mettre en œuvre et à exploiter. Les stratifiés obtenus par empilement de couches d'orientations différentes, sont sujet au délaminage qui se traduit par une décohésion plane inter laminaire. Le délaminage représente le principal mode de rupture de ces matériaux. La résistance au délaminage, dont il faut toujours tenir compte, dépend de la nature de la résine de la liaison renfort – matrice, du type et du pourcentage de renfort. Les contraintes de cisaillement peuvent être déterminé par la relation (2).

L'essai de cisaillement quasi-pur sur poutre courte est effectué sur un dispositif de flexion trois points, conformément aux recommandations de la norme EN ISO 14125.

1.2.2 Essai de flexion sur poutre élancée

La rupture intervient sous l'action des contraintes normales de flexion (seules ou couplées aux contraintes de cisaillement), pour lesquelles la résistance au délaminage localisé à la dernière interface ne peut être approximée par la relation (2).

2. DISCUSSION DES RESULTATS

Pour apprécier quantitativement la résistance au délaminage, un essai de flexion trois points entre des appuis rapprochés (tableau 1 et figure 1) est effectué afin d'engendrer des contraintes de cisaillement dans

le plan perpendiculaire aux plis. Il s'agit de l'essai de cisaillement sur poutre courte SBS (Short Beam Shear) ou essai de résistance au cisaillement inter laminaire ILSS (Inter Laminar Shear Strength). Une diminution de la distance entre appuis conserve, en effet l'effort tranchant, donc les contraintes de cisaillement, alors qu'elle réduit proportionnellement les contraintes normales.

La rupture se produit par cisaillement inter-laminaire (figure 2), à partir de laquelle la résistance au délaminage peut être approximée par la relation (2).

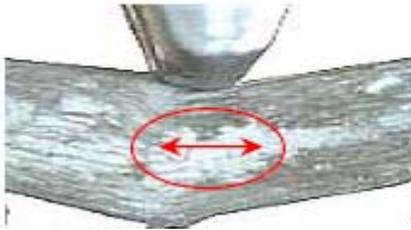


Figure 2 : Mode de rupture par flexion trois points sur éprouvette courte

Dans le cas des éprouvettes élancées, la défaillance de l'éprouvette s'est produite par rupture des fibres en traction (dans la zone de flexion maximale) suite à la formation d'un délaminage localisé à la dernière interface (figure 3).

Ce délaminage rompt la liaison du dernier pli avec le reste du composite, ce qui induit « une surcharge » longitudinale provoquant ainsi la rupture en traction du dernier pli.



Figure 3 : Mode de rupture par flexion trois points sur éprouvette élancée

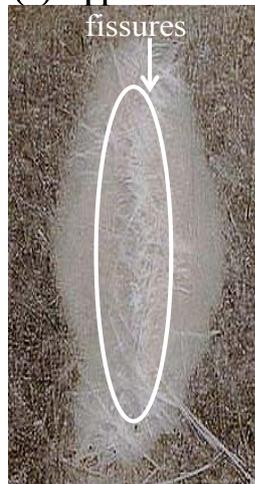
Les figures 4, 5 et 6 représentent l'évolution du dommage en fonction de l'énergie d'impact au niveau de la face inférieure des plaques impactées. Il apparaît, qu'on peut associer à chaque niveau d'énergie, une forme et une valeur appropriée de la taille de la surface endommagée [6, 7 et 8]. Ce volume endommagé est représenté par un cône dont l'axe de révolution passe par le point d'impact (figure 7).

Énergie = 44,19 [Joules]	51,56 [J]	58,92 [J]	66,29 [J]	73,65 [J]	80,93 [J]	86,32 [J]

a) Déchaussement des fibres



(b) Apparition fissures



(c) Propagation des fissures

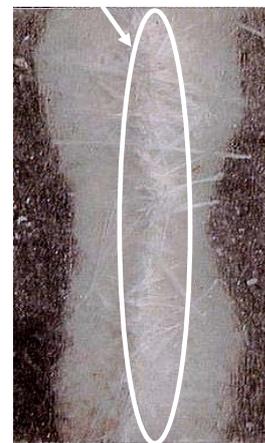


Figure 4 : Différentes phases de propagation du dommage au niveau de la dernière interface résultant d'un impact (énergie impact = 66,29 Joules et la vitesse d'impact = 5,5 m/s)

La forme conique du volume endommagé évolue avec le niveau de l'énergie d'impact, jusqu'à une valeur de l'ordre de 65% de l'énergie de défaillance totale de la plaque. Au-delà de ce seuil (65% de l'énergie de défaillance correspondant à 66,29J sous une vitesse d'impact égale à 5,5m/s), la forme du volume endommagé commence à évoluer autrement. Ce changement de forme serait dû à l'apparition de déchaussement de fibres de la matrice, voire la rupture des fibres et s'accroît avec l'apparition de fissures au niveau de la dernière interface (figure 4).

Au-delà de 85% de l'énergie de défaillance, la forme de la zone endommagée devient de plus en plus allongée dans la direction de la largeur, direction de propagation de fissures. Cette propagation accélère la perte de résistance et de rigidité résiduelles des plaques impactées (figures 5 et 6).

Pour un même niveau d'énergie d'impact, la perte de rigidité résiduelle en flexion désignée dans la figure 5 par le rapport : $\frac{\tilde{E}}{E_0}$ est significative par rapport à la réduction constatée dans le cas du cisaillement (représentée par le rapport : $\frac{\tilde{G}}{G_0}$). Cela est confirmé par la chute rapide de la résistance résiduelle normalisée en flexion $\frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_0}$ dès les faibles niveaux d'énergie d'impact, comme montrée dans la figure 6.

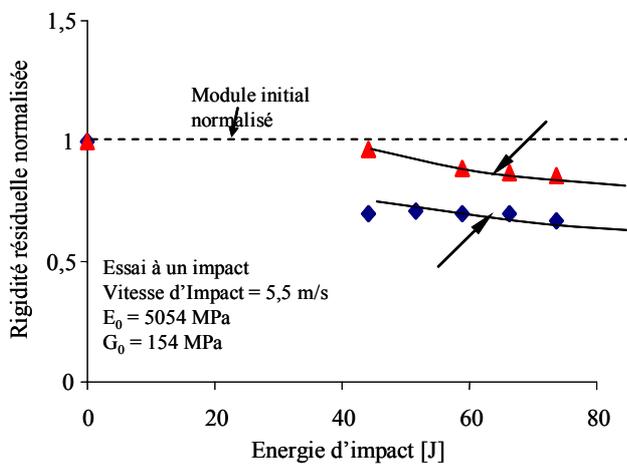


Figure 5 : Variation de la rigidité dans la direction longitudinale et transversale en fonction de l'énergie d'impact

Pour un même niveau d'énergie d'impact, la perte de rigidité résiduelle en flexion désignée dans la figure 5 par le rapport : $\frac{\tilde{E}}{E_0}$ est significative par rapport à la réduction constatée dans le cas du cisaillement (représentée par le rapport : $\frac{\tilde{G}}{G_0}$). Cela

est confirmé par la chute rapide de la résistance résiduelle normalisée en flexion $\frac{\tilde{\sigma}}{\sigma_0}$ dès les faibles niveaux d'énergie d'impact, comme montrée dans la figure 6.

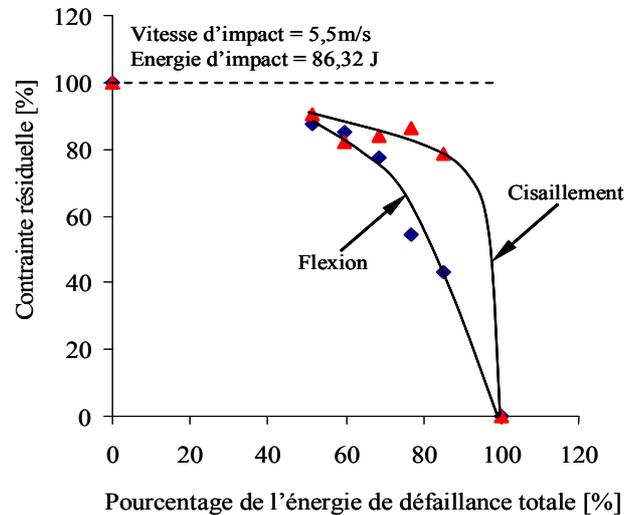


Figure 6 : Variation de la contrainte résiduelle en fonction du pourcentage de l'énergie d'impact à rupture, (un seul impact)

Avec :

\tilde{E} et \tilde{G} désignent respectivement le module d'élasticité longitudinale et transversale du matériau endommagé.

E_0 et G_0 désignent respectivement le module d'élasticité longitudinale et transversale du matériau non endommagé.

$\tilde{\sigma}$ et σ_0 désignent respectivement la contrainte pour un matériau endommagé (contrainte résiduelle) et la contrainte pour un matériau non endommagé.

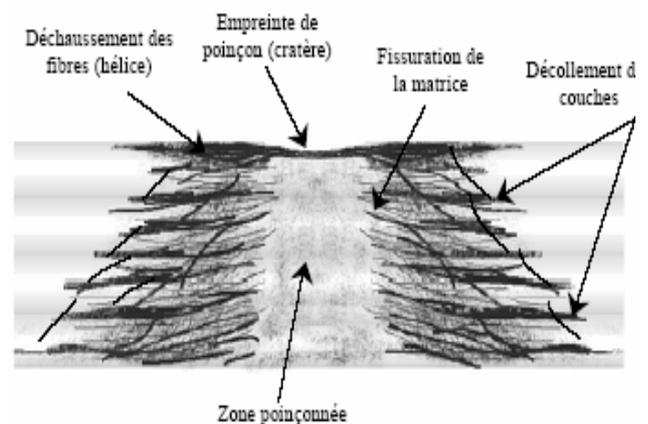


Figure 7 : Schématisation du cône d'endommagement

CONCLUSION

Les essais d'impact conduits sur des plaques d'épaisseur 8mm à 5 plis, en composite verreE/polyester (mat) fabriquées par l'ENPC Chlef, nous ont permis de suivre l'évolution du volume et de la forme de la zone endommagée en fonction des différents niveaux d'énergie d'impact. L'analyse par des observations visuelles en utilisant la technique de lumière intense placée judicieusement derrière la plaque impactée, nous a permis de conclure que le délaminage apparaît surtout au niveau de la dernière interface dès les faibles énergies d'impact (figure 4).

Le délaminage se manifeste dans une première phase sous la forme d'un cône endommagé de base circulaire, dont l'axe de révolution passe par le point d'impact. A la fin de cette phase, on observe un début de décollement des couches et de déchaussement des fibres (figure 4a et 7).

Dans une seconde phase, on observe un changement de la forme circulaire du volume endommagé vers une forme elliptique. Ceci est dû à l'aggravation du déchaussement des fibres, et à l'apparition de fissures et voire même la rupture des fibres. Dans cette étape l'aire de la zone endommagée voit son évolution ralentie par un quasi-blocage de la propagation du délaminage dans le sens de la largeur (figure 4b).

Dans une troisième phase, le volume de la zone endommagée évolue vers une forme d'un « haricot », du essentiellement à la propagation rapide de la fissure dans le sens de la largeur.

REFERENCES

- [1] A. David Wyrick and F. Donald Adams, residual strength of a carbon/epoxy composite material subjected to repeated impact. *Journal of Composite Materials*, Vol.22, pp. 749-765, (1988).
- [2] F. Ernest Dotst, Larry B. Ilcewicz, B. William Avery, and R. Brian. Coxon Effects of Stacking Sequence on Impact Damage Resistance and Residual Strength for Quasi-Isotropic Laminates. *Composite Materials. Fatigue and Fracture* (third volume), ASTM STP. T. K O'Brien, pp. 476-500 (1991).
- [3] N.K. Naik, R. Ramasimha, H. Arya, S.V. Prabhu and N. Shama Rao, Impact response and damage tolerance characteristics of glass-carbon/epoxy composite plates. *Composites Engineering*, vol B32, pp. 565-574 (2001).
- [4] G. Belingardi and R. Vadori. Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 27, pp. 213-229 (2002).
- [5] L. Guillaumat. Aide au pré-dimensionnement de structure composites impactées. *Mec. Ind.*, pp. 235-240 (2000).
- [6] D. Liu. Impact-induced delamination – A Review of bending stiffness mismatching. *Journal of Composite Materials*, vol. 22, pp. 674-692 (1988).
- [7] W.J. Cantwell and J. Morton. Comparison of the low and high velocity impact response of CFRP. *Composites*, Vol. 20, N°.6, pp. 545-551 (1989).
- [8] A.M. Roach, K. E. Evans and N. Jones, The penetration energy of sandwich panel elements under static and dynamic loading: Part I. *Composite Structures*, Vol. 42, pp. 119-134, (1998).