



HAL
open science

Etude du comportement à l'impact et compression post impact de composites à renfort tissu de carbone assemblée par tufting

Alan Martins, Kamel Khellil, Zoheir Aboura, Abdelouahed Laksimi

► To cite this version:

Alan Martins, Kamel Khellil, Zoheir Aboura, Abdelouahed Laksimi. Etude du comportement à l'impact et compression post impact de composites à renfort tissu de carbone assemblée par tufting. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621593

HAL Id: hal-01621593

<https://hal.science/hal-01621593>

Submitted on 23 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude du comportement à l'impact et compression post impact de composites à renfort tissu de carbone assemblée par tufting

Study of the impact and compression after impact behavior in tufted carbon fabric composites

Alan Martins¹, Kamel Khellil¹, Zoheir Aboura¹, Abdelouahed Laksimi¹

¹ : Département de Génie Mécanique, Laboratoire Roberval
UMR-CNRS 7337, Centre de Recherche de Royallieu, Université de Technologie de Compiègne
Compiègne, France - 60200 Cedex 3
e-mail : alan-tulio.martins@utc.fr

Résumé

Ces travaux s'intéressent à la tenue de structures composites renforcées par tufting à l'égard de sollicitations type impact et compression post impact (CAI). Nous avons étudié l'effet de la densité de couture ainsi que l'effet de l'inclinaison des coutures en comparaison à des structures non-renforcées. Les échantillons ont été soumis à l'impact hors plan en variant l'énergie (25 et 60J) afin de comparer leur réponse au cours de chargement ainsi qu'après les tests en comparant la zone endommagée par analyse C-Scan. Ensuite, les essais multi-instrumentés CAI assisté par émission acoustique et Corrélation d'Image Numérique ont servis à évaluer le comportement des matériaux selon leurs configurations. Les résultats ont montré que les composites renforcés par tufting repoussent les premiers endommagements pendant impact et restreint la zone endommagée en arrivant jusqu'à une réduction d'environ 4 fois en comparaison avec les matériaux non-cousus. Lors de la CAI, l'augmentation de la résistance résiduelle est évidente pour les composites renforcés et ils présentent des meilleurs résultats suite à l'impact à 60J, avec une augmentation de 52% et 14% pour les renforts transversaux et inclinés respectivement. En comparaison avec les résistances obtenues pour les composites non-impactés la perte de résistance est moins importante pour les composites renforcés.

Abstract

The present work focuses on study and development of composite structures reinforced by tufting submitted to impact and Compression After Impact (CAI). It was studied the effect of density and angle of tufting reinforcement into laminate composites in comparison with non-tufted structures. The samples were subjected to out-of-plane impact by varying energy (25 and 60J) to evaluate their response during loading and after the tests by comparing the damaged area on C-Scan analysis. Then, the multi-instrumented CAI tests assisted by acoustic emission and Digital Image Correction evaluated the residual strength and structures response according to their parameters. The results showed that tufting reinforced composites repel the first damages on impact loading and restricts the damaged area by reducing it to about 4 times in comparison with non-tufted. During CAI, the increase in residual strength is evident for tufted composites which show better results under impact at 60J, with a 52% and 14% increase for the transverse and angular reinforcements. Compared to the ultimate strength obtained from non-impacted composites, the loss of strength is less important for tufted composites.

Mots Clés : piquage; composites 3D; impact; compression post impact

Keywords : tufting; 3D composites; impact; compression after impact

1. Introduction

Les matériaux composites stratifiés sont exposés aux endommagements par impact, qu'ils soient en fonctionnement, pendant des opérations de maintenance ou même à leur fabrication [1,2]. Lorsqu'une structure stratifiée est impactée plusieurs modes de dommages se produisent, tels que les fissures matricielles, les délaminages et les ruptures de fibres [3]. Le délaminage peut être défini comme le mécanisme principal parmi les endommagements créés lors de l'impact. Ce mode d'endommagement apparait surtout en impact à faible vitesse. Le délaminage se manifeste sur toute l'épaisseur du stratifié. Ceci réduit considérablement la capacité de supporter les chargements, en particulier sous des charges en compression [4]. La tenue à l'impact des structures composites peut

être améliorée en renforçant la matrice ou la troisième direction du stratifié [5]. Cela a pour effet d'améliorer la résistance interlaminaire et par conséquent d'accroître leur tenue mécanique [1].

Les matériaux composites peuvent être rigidifiés à partir de l'incorporation des particules dispersées dans la matrice polymère. Par exemple, on peut avoir recours à des renforts rigides, micro particules polymères (ex. caoutchouc et thermoplastiques) et des nanoparticules. Cependant, rigidifier les résines n'apporte que des améliorations modérées sur la résistance à l'impact [6]. Aussi, plusieurs problèmes liés à la répartition appropriée des particules dans la matrice et de la forte augmentation de la viscosité de la résine rendent ce type de mise en œuvre complexe [7].

Des gains plus importants peuvent être apportés en utilisant des renforts 3D. Ils sont capables de concentrer les endommagements sur une petite zone, en réduisant la propagation des fissures, surtout le délaminage. Ce type de composite est conçu à partir d'un réseau de fibres dans les trois directions. Il existe plusieurs processus de fabrication des composites 3D et ils peuvent être classifiés selon le mode avec lequel les fibres sont déposées sur la préforme sèche [8]. Les principales méthodes sont le tissage 3D, le tufting, le stitching, le Z-pinning et le Z-anchoring. Ces processus dépendent aussi du type de préforme à utiliser (ex. préforme sèche ou pré-imprégné) ainsi que de l'application souhaitée.

Malgré le fait que les composites à renfort 3D offrent des avantages intéressants par rapport à leurs homologues 2D, les études autour de ces matériaux restent en dessous des composites à architectures 2D. Les travaux dans la littérature montrent que la densité de couture est un facteur important dans la tenue à l'impact des structures composites [9]. En effet une augmentation de la densité de couture génère une réduction de la zone endommagée due à l'impact et une augmentation de la résistance. Le mode d'endommagement lors de l'impact étant principalement gouverné par des délaminages de type cisaillement (Mode II) et très peu de délaminage de Mode I [10]. Ainsi, nous avons pris en compte ce fait lors l'étude, par l'insertion des renforts sur la préforme sèche.

Ces travaux s'intéressent à la tenue de structures composites renforcés par le tufting à l'égard des sollicitations de type impact et compression post impact (CAI). Nous avons étudié l'effet de la densité de couture ainsi que l'effet de l'inclinaison des coutures en comparaison à des structures non cousus.

2. Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux

Les composites tissés fibre de carbone/époxy ont été fabriqués à partir d'un tissu satin 5HS en fibres de carbone T300 ayant un grammage de 364 g/m² et un système de résine EPOLAM 5015. Pour le processus de tufting, un fil de carbone 2K Tenax-J HTA 40 guipé par deux fils Zylon a été utilisé pour renforcer la préforme du tissu de carbone sèche à l'aide d'un bras robot KUKA 6 axes (KR 100-2 HA 2000). Les éprouvettes ont été fabriquées en utilisant 12 couches avec la séquence d'empilement [0]₁₂. Deux pas de coutures ont été adoptés : 5x5 mm et 10x10 mm. De plus deux types d'introduction du renfort dans la troisième direction ont été utilisés : 0°(verticalement) et incliné de 30° par rapport à la verticale (Fig.1a et b respectivement). Les plaques composites ont été infusées par moulage VARTM, avec un cycle de durcissement à température ambiante pendant 24 heures. Puis avec une post-cuisson à 80°C pendant 16 heures. Ensuite, des échantillons avec des dimensions de 100x150 mm ont été préparés pour les tests d'impact et compression post impact. Les spécimens ont été désignés selon la densité de renfort du tufting et aussi l'inclinaison : REF, pour la référence sans couture, T10 et T5 pour les composites renforcés à 0° avec une densité 10x10 et 5x5 respectivement, et A10 et A5 pour celles renforcées à 30° et ayant la densité 10x10 et 5x5 respectivement.

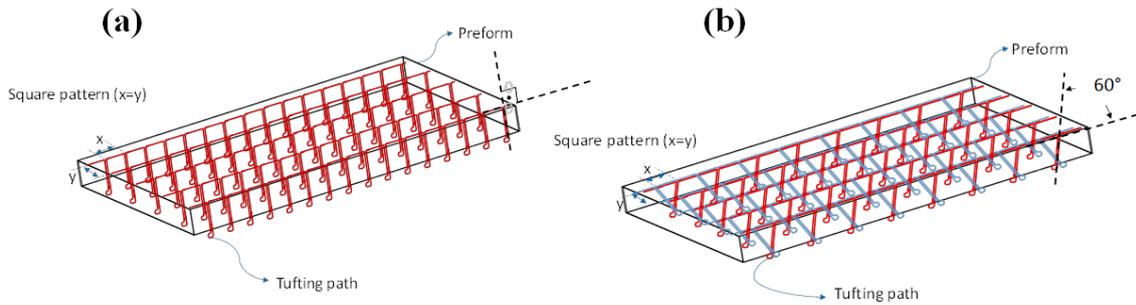


Fig. 1. Schéma d'angle d'insertion des renforts par tufting (a) transversal et (b) incliné

2.2. Méthodes

Les essais d'impacts ont été effectués à 25J et 60J par l'intermédiaire d'une machine par poids tombant Instron Dynatup 9250HV sur des plaques composites de dimensions 100x150 mm encastrées sur leur périphérie. Outre la mesure de la force, et le déplacement de l'impacteur, un capteur laser est utilisé pour mesurer le déplacement de la partie inférieure des plaques et en extraire la déflexion maximale (δ_{max}). Suite aux essais d'impacts une analyse par Ultra Sons (US) est menée pour analyser l'étendue de la zone endommagée en utilisant l'image reconstruite par les signaux d'écho de fond et en mesurant la zone à l'aide du logiciel ImageJ.

Suite à ces essais d'impact, des essais de compression ont été effectués selon la norme ASTM D7137-12 [11]. Ces essais ont été instrumentés par des capteurs d'émission acoustique (EA). Les champs de déplacement et déformation plans et hors plans ont été mesurés par stéréo corrélation d'images numériques (CIN). En plus, des essais de compression sur les éprouvettes non-impactées ont été exécutés selon la norme ASTM D6641-14 afin de comparer l'effet du renfort sur les propriétés dans le plan du stratifiée. Les tests ont été réalisés uniquement sur éprouvettes avec la plus grande densité de renfort (A5 et T5) ainsi que la référence.

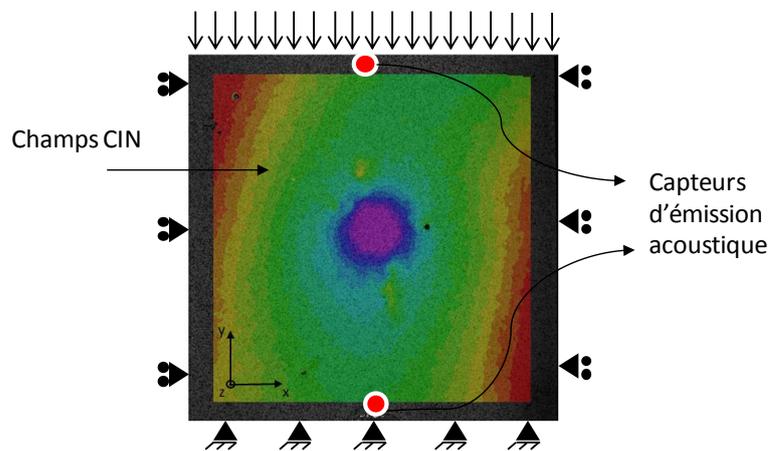
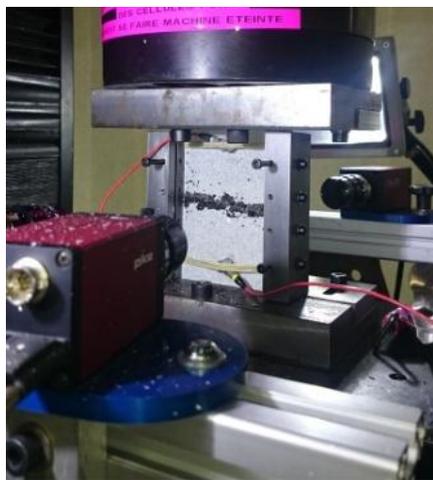


Fig. 2. Montage d'essai CAI avec la CIN et les capteurs d'émission acoustique

3. Résultats

3.1. Essais d'impact

La Fig.3 montre des courbes typiques pour chaque configuration d'éprouvette impactée à 25J. Ces courbes ont permis d'évaluer les valeurs du Point onset (P_{onset}). Ce point signifie les premiers endommagements significatifs qui apportent une diminution de la rigidité du composite. Les analyses ont été aussi faites pour les éprouvettes impactées à 60J. En plus, les réponses obtenues par laser à la surface inférieure ont été traitées et sont présentées au niveau du Tab.1 avec

les données de P_{onset} . Il en ressort que l'introduction d'un renfort dans la troisième direction améliore la tenue des structures à l'égard de l'impact quelque soit le pas de couture ou l'orientation angulaire. Concernant le pas de couture, les résultats obtenus confirment les conclusions de la littérature à savoir l'augmentation de la densité a pour effet d'améliorer les performances. Pour ce qui est de l'angle de la couture, les résultats sont plus mitigés. En effet à faible énergie d'impact (25J) les structures à renfort incliné A5 présentent la plus faible déflexion. De plus la charge d'amorçage de l'endommagement P_{onset} est bien supérieure à celle de la couture verticale, notamment à 60J. Une première explication peut se résumer dans la meilleure tenue au cisaillement interlaminaire des coutures inclinées. Mais ce point mérite d'être confirmé.

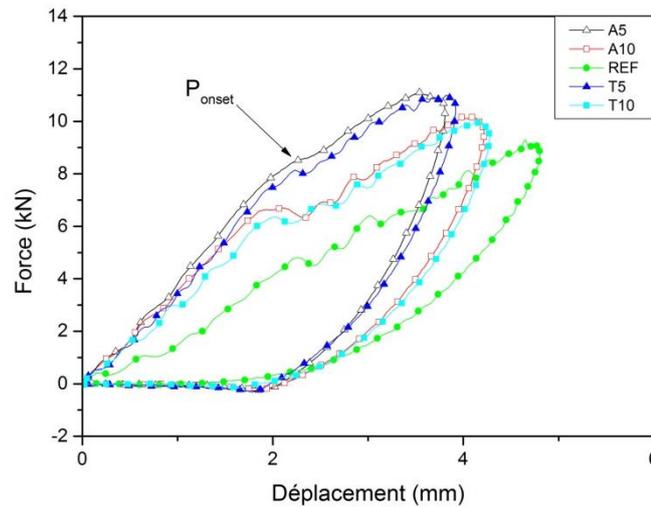


Fig. 3. Courbe de force-déplacement pour les éprouvettes sous impact à 25J

	Déflexion maximale (mm \pm ÉT)		Point d'onset (kN \pm ÉT)	
	25J	60J	25J	60J
Référence	-4,78 \pm 0,24	-7,03 \pm 0,15	6,31 \pm 0,08	6,52 \pm 0,08
T10	-3,66 \pm 0,06	-6,39 \pm 0,22	6,99 \pm 0,07	7,15 \pm 0,01
T5	-3,47 \pm 0,16	-5,59 \pm 0,11	7,98 \pm 0,09	8,99 \pm 0,01
A10	-3,84 \pm 0,13	-6,61 \pm 0,14	6,85 \pm 0,62	6,71 \pm 0,22
A5	-3,33 \pm 0,13	-6,02 \pm 0,07	8,18 \pm 0,74	11,30 \pm 0,01

Tab. 1. Données de déflexion et point d'onset obtenues lors essais d'impact

La corrélation entre la zone endommagée et les paramètres de tufting aux énergies soumises sous impact est indiquée dans la Fig. 4. Les résultats ont montré que la zone endommagée est inversement proportionnelle à la densité de renfort. À partir de ces résultats, les échantillons avec des renforts transversaux impactés sous une énergie de 25J ont été les plus efficaces pour réduire la progression du délaminage. Cependant, sous 60J, les échantillons T10 avaient des zones endommagées supérieures à celle de A10, ce qui n'est pas le cas pour l'énergie inférieure. La configuration T10 sera étudiée dans les travaux à venir pour évaluer ces résultats. En général, il est possible de conclure que le renforcement par tufting réduit le développement des fissures, en concentrant les dommages dans une zone plus petite. En ce qui concerne le paramètre angulaire, surtout dans le cas de l'impact à 60J, il n'y a pas de différences notable entre le tufting angulaire et transversal (A5 et T5).

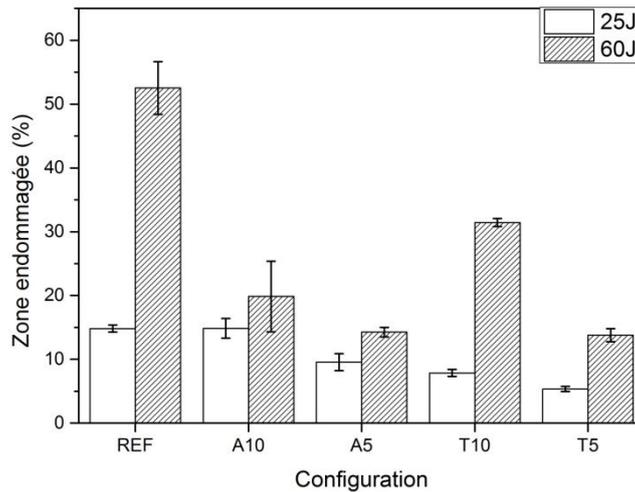


Fig.4. Zone endommagée moyenne pour: les éprouvettes REF; T10; T5; A10 et A5 impactées à 25 J et 60 J

La figure 5a-c présente les zones endommagées produits sous les différentes configurations d'éprouvettes lors impact pour les échantillons REF, T5 et A5 respectivement. Les schémas ont été obtenu à partir d'évaluation des micrographies optiques sur l'épaisseur, plus spécifiquement sur le centre de la structure. Il est possible de voir que les fils de tufting ne sont pas schématisé droits. Ceci est lié au processus VARTM, qui compact la préforme et écrase les fils. Ce fait doit être pris en compte surtout dans les futures simulations par éléments finis. En outre, une couche de résine provoquée par les boucles provenant des renforts tufting est créée dans la surface du stratifié, ce qui préconise le déclenchement et le développement des fissures comme on peut le voir sur les Fig.5b et c.

La Fig.5a présente l'évolution de la fissure pour la référence. Il est possible de noter que la matrice se fissure à environ 45° en raison de la contrainte de cisaillement transversale jusqu'à atteindre l'interface du tissu et continue à se propager par délaminage. Si on considère que l'impact se réduit à la flexion, les endommagements sur la couche inférieure sont dus à une forte contrainte de traction. Le scénario des fissures est traduit pour une cône avec la pointe sur la surface impactée et la base sur la partie opposée. L'échantillon a un comportement similaire à la littérature pour les composites stratifiés. La Fig. 5b montre le développement des fissures sur le stratifié renforcé transversalement, T5. Contrairement aux éprouvettes non cousus, le délaminage ne se manifeste plus et les fissures sont en majorité à 45° . Les renforts empêchent le développement des fissures en déviant leurs pointes autour d'elles. Ce qui diminue l'énergie d'endommagement. Enfin, pour les éprouvettes avec des renforts inclinés (Fig.5c), il est à noter que le délaminage est plus important avec un renforcement transversale mais reste toujours inférieure à la référence. Les renforts ont le rôle de détourner les fissures et surtout d'arrêter le progrès du délaminage. Il est important de noter que différemment à ce qui a été planifié, les fils ne se sont pas croisés au centre du matériau. Ceci est expliqué par l'angle de tufting (60° par rapport à la surface).

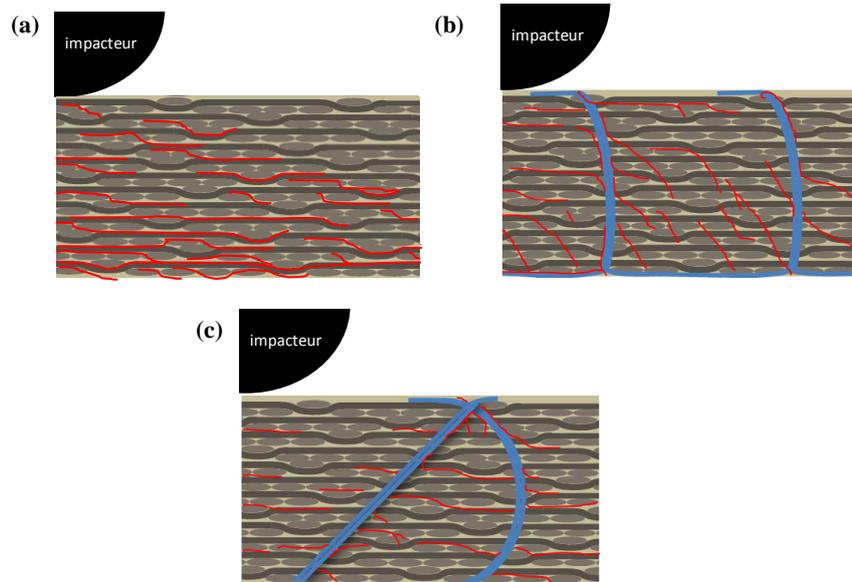


Fig.5. Schématisation des endommagements produits lors impact à 25J

3.2. Compression post impact (CAI)

La Fig.6 montre la résistance résiduelle moyenne obtenue à partir de la force maximale sur les différentes configurations d'échantillons sous essais CAI. La seule configuration qui a montré une résistance inférieure à la référence était l'éprouvette A10. En général, le renforcement par tufting joue un rôle important en augmentant la résistance transversale des échantillons.

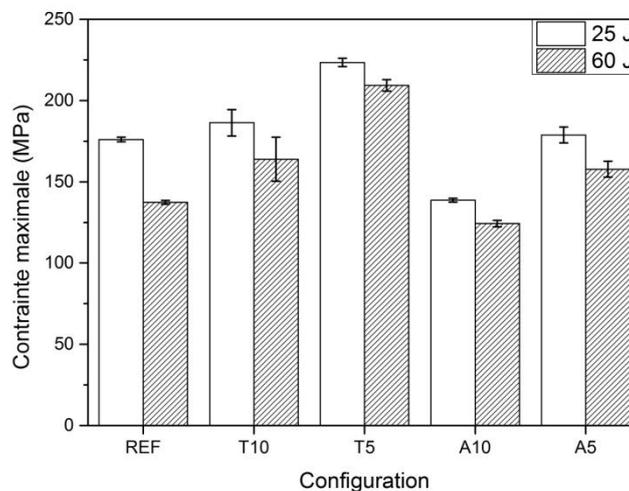


Fig.6 . Les contraintes résiduelles en compression post impact pour les différentes configurations

Afin de mieux comparer les échantillons les plus performants (A5 et T5) par rapport aux composites stratifiés sans renfort, des essais de compression ont été fait pour les trois configurations non-impactées (Fig. 7). Il est évident qu'il y a une perte de résistance dans le sens longitudinal des composites renforcés par tufting non-impactés par rapport à la référence. Cette réponse est due aux endommagements créés lors de l'insertion des fils de couture. Ces derniers altèrent les fibres de la préforme et désaligne les mèches. Cet effet, produit une poche de résine autour des mèches. Les éprouvettes renforcées par tufting ont montré une perte de resistance à l'impact (ration avant/après impact) moins importante que celle non cousus. A titre d'exemple, les résultats présentent une perte de résistance moins importante pour les composites cousus impactés, 31 et 35% pour T5 et A5

respectivement, en comparaison à la référence impactée à 25J avec une valeur de 61%. Pour les composites impactés à 60J, les pertes étaient 35 et 41% pour T5 et A5, et 69% pour la référence.

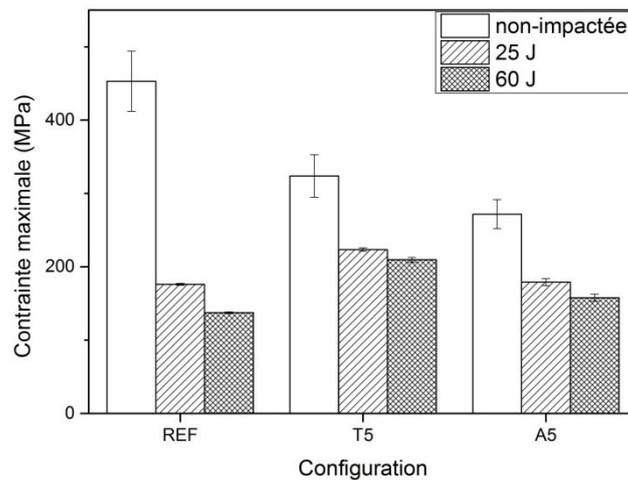


Fig.7. Comparaison entre les contraintes maximale longitudinale et les résiduelles pour les éprouvettes REF, T5 et A5

La Fig.8 montre les micrographies optiques pour les composites non-impactés. Il est évident que pour les composites renforcés par fils inclinés (Fig.8b) et transversal (Fig.8c) la rupture est moins brute comme pour la référence (Fig.8a). Le tufting montre son rôle en évitant l'ouverture des plis comme présente la référence, en particulier en empêchant les progrès des délaminages pour le mode d'ouverture (mode I) sous compression. Ce fonction a été aussi important pour les composites renforcés impactés, qu'évitait des ouvertures des plis et flambage des composites.

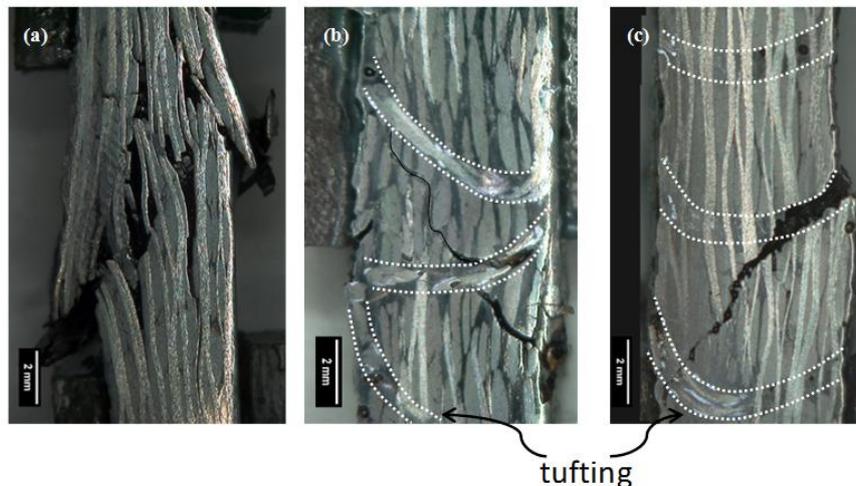


Fig.8. Micrographies optiques obtenues post-mortem sous compression des éprouvettes non-impactées

Les résultats des essais de CAI sont en bonne corrélation avec les données par CIN et EA. On a tracé pour chaque configuration d'éprouvette, les courbes de contrainte, déplacement hors plan obtenu par CIN et énergie cumulée par EA sur la Fig.9. Comme on peut le voir, l'activité acoustique devient plus haute au moment où le flambement local devient plus fort. Cette procédure a également été faite à 60 J. Il nous permet de définir une contrainte critique liée à l'EA, qui à partir de laquelle la ruine devient plus rapide. En plus des résultats de l'énergie cumulée et de leur bonne corrélation avec la déflexion soudaine, la classification non supervisée des signaux d'émission acoustique a été effectuée. Les paramètres de classification sont l'amplitude du signal, nombre de coups au pic, nombre de coups et à l'énergie (les entrées la méthode k-means) pour classer les signaux en 4 classes. Cette méthode a appliqué les paramètres de distance euclidienne et de partitionnement initial aléatoire. Suite à cela, on a constaté qu'une classe de signal spécifique apparaît au moment où le déplacement hors-plan (w) est plus élevé. À partir de ce point (P_0) il déclenche un échec brutal.

Cette classe nommée Classe 1 est montrée sur la Fig.9. Celle-là est composée de signaux d'une énergie inférieure à la moyenne ainsi que de leurs nombre de coups.

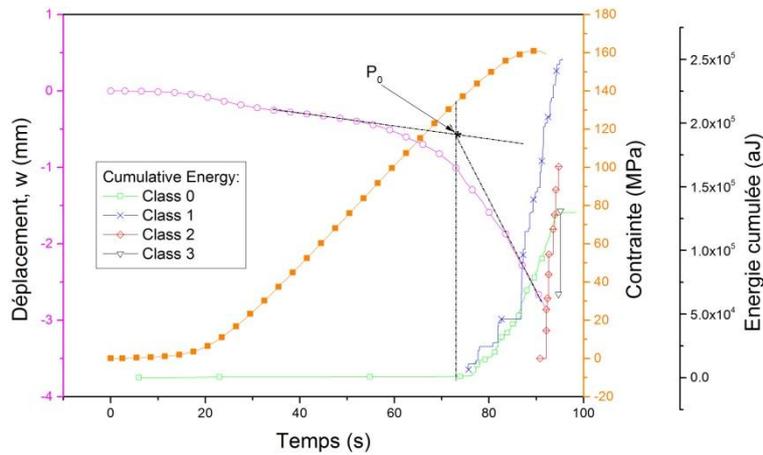


Fig. 9. Exemple de classification des signaux, avec la courbe de contrainte en compression et le déplacement hors-plan (w) pour A5 impactée à 25J

Les Fig.10 et 11 montrent l'évolution de la famille des signaux acoustiques correspondants aux mécanismes critiques relatifs à la ruine majeure du matériau (classe 1) pour les composites impactés à 25 et 60J respectivement. Là également, nous remarquons l'effet bénéfique des coutures qui permet de repousser l'avènement de ces signaux. En outre, la densité joue un rôle important pour retarder le seuil critique d'endommagement majeurs. Aussi, il est possible de voir que le tufting transversal est plus efficace que le tufting angulaire. Enfin, ces résultats valident l'efficacité du tufting sous CAI, en particulier pour les éprouvettes renforcée suivant la transversale. De plus, ils sont en accord avec les résultats de contrainte maximale obtenus sous CAI. En effet, l'augmentation de la contrainte critique au P₀ permettra une rupture plus tard.

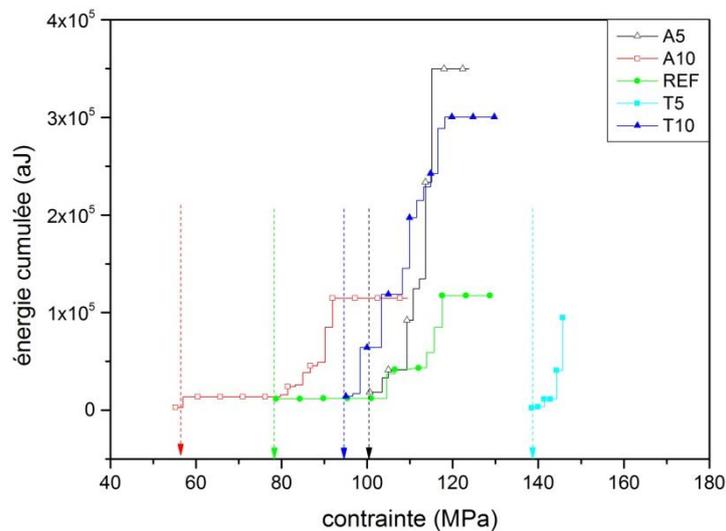


Fig.10 . Comparaison des signaux d'énergie cumulée pour la Classe 1 sous CAI des éprouvettes impactées à 25J

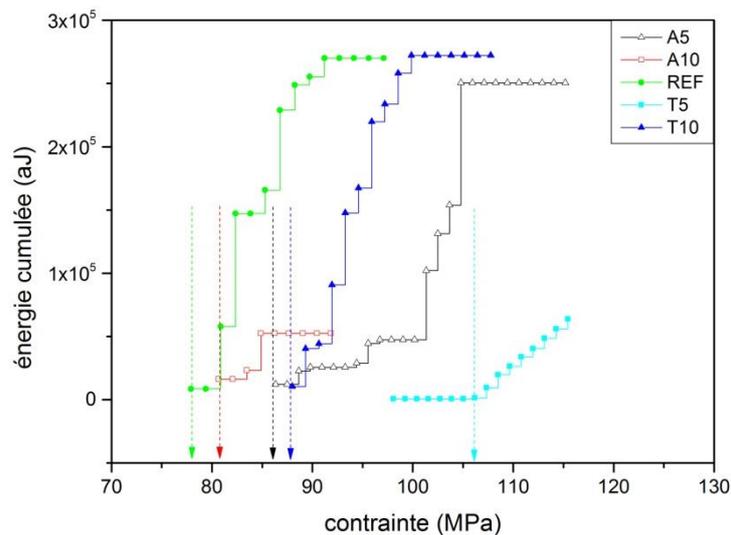


Fig.11 . Comparaison des signaux d'énergie cumulée pour la Classe 1 sous CAI des éprouvettes impactées à 60J

4. Conclusions

Les composites renforcés par tufting ont amélioré significativement la résistance aux endommagements sous impact. Ceci a réduit le développement des fissures, en les concentrant dans une zone plus petite par rapport à la référence. De plus, il a été démontré que les renforts changent les mécanismes d'endommagement pendant l'impact, en freinant l'avancée des fissures et les déviant autour des fils. Aussi, les positions des fissures jouent un rôle différent en fonction de l'inclinaison. Pour cela on a constaté que la couture transversale la plus dense (T5) empêche quasi totalement les délaminages, et garde principalement les fissures à 45°. Cette réponse a été mieux observée sous impact à 60J, quand le renfort transversale (T5) a diminué d'environ 4 fois la zone endommagée. Les composites avec des renforts transversales ont montré supériorité sur le retard des premières endommagement capables de affaiblir la structure (P_{onset}).

Les résultats sous les tests CAI ont montré une supériorité dans la plupart des renforts tufting en exception à la configuration A10 qui mérite d'être investigué. Les renforts sont capables de résister à l'ouverture des plis comme dans le cas des composites sous compression non-impactés. Le fait de résister surtout au mode I de délaminage, évite l'évolution des fissures et donc repousse les endommagements majeurs capables d'amener la structure à la ruine.

Enfin, les données obtenues à partir de la caractérisation multi-instrumentée pendant les tests CAI ont montré que la densité et l'angle de renfort modifient l'énergie cumulée sur les signaux d'émission acoustique. Il est notable l'effet bénéfique des renforts par tufting qui permet de repousser l'avènement de ces signaux. Il s'est avéré que la configuration T5 est la plus performante, en retardant la ruine.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le CNPq (Brésil) pour la bourse accordée à Alan Martins, ce qui a permis la réalisation de cette recherche.

Références

- [1] J.H. BYUN, S.W. SONG, C.H. LEE, M.K. U.M., BS HWANG, "Impact properties of laminated composites with stitching fibers", *Composite structures*, vol. 76, no 1, pp. 21-27, 2006.
- [2] M.V. HOSUR, M.R. KARIM, and S. JEELANI, "Experimental investigations on the response of stitched/unstitched woven S2-glass/SC15 epoxy composites under single and repeated low velocity impact loading", *Composite structures*, vol. 61, no 1, pp.89-102, 2003.
- [3] M. AKTAŞ, C. ATAS, B.M. İÇTEN and R. KARAKUZU, "An experimental investigation of the impact response of composite laminates", *Composite Structures*, vol. 87, no 4, pp.307-313, 2009.

- [4] F. LARSSON, "Damage tolerance of a stitched carbon/epoxy laminate. Composites Part A: applied science and manufacturing", vol. 28, no 11, pp.923-934, 1997.
- [5] D. KARUPPANNAN, V. SIVARAMAN, K.M. GADDIKERI, R. SUNDARAM and A. RAMESH, " Effect of tufting on mechanical properties of laminated composites", *In ISAMPE National Conference on composite Materials*, Coimbatore, pp. 2-3, 2012.
- [6] A.J. KINLOCH, K. MASANIA, A.C. TAYLOR, S. SPRENGER and D. EGAN, "The fracture of glass-fibre-reinforced epoxy composites using nanoparticle-modified matrices", *Journal of Materials Science*, vol. 43, no 3, pp.1151-1154, 2008.
- [7] N. SELA and O. ISHAI, "Interlaminar fracture toughness and toughening of laminated composite materials: a review. *Composites*, vol. 20, no 5, pp.423-435, 1989.
- [8] A.P. MOURITZ, "Fatigue of 3D textile-reinforced composites", *Fatigue of Textile Composites*, pp.255, 2015.
- [9] G. DELL'ANNO, D. CARTIÉ, I. PARTRIDGE, A. REZAI, " Exploring mechanical property balance in tufted carbon fabric/epoxy composites", *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no 11, pp.2366-2373, 2007.
- [10] B. M'MEMBE, S. GANNON, M. YASAEE, et al., "Mode II delamination resistance of composites reinforced with inclined Z-pins ", *Materials & Design*, vol. 94, pp. 565-72, 2016.
- [11] STANDARD, A.S.T.M. D7137, "Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates", *ASTM Int.*, West Conshohocken, PA, 2012.