



HAL
open science

Comparaison expérimentale de l'absorption d'énergie lors d'impact sur plusieurs structures mousse-composite renforcées

Olivier Dorival, Pablo Navarro, Steven Marguet, Caroline Petiot, Michel Bermudez, Didier Mesnagé, Jean-François Ferrero

► To cite this version:

Olivier Dorival, Pablo Navarro, Steven Marguet, Caroline Petiot, Michel Bermudez, et al.. Comparaison expérimentale de l'absorption d'énergie lors d'impact sur plusieurs structures mousse-composite renforcées. 19e Journées Nationales sur les Composites - JNC 2015, Jun 2015, Villeurbanne, France. hal-01183163

HAL Id: hal-01183163

<https://hal.science/hal-01183163>

Submitted on 6 Aug 2015

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.

Comparaison expérimentale de l'absorption d'énergie lors d'impact sur plusieurs structures mousse-composite renforcées

Experimental comparison of impact energy absorption by several reinforced foam composite structures

Olivier Dorival¹, Pablo Navarro¹, Steven Marguet¹, Caroline Petiot², Michel Bermudez²,
Didier Mesnagé², Jean-François Ferrero¹

1 : Institut Clément Ader (ICA)
Université de Toulouse, INSA, UPS, Mines Albi, ISAE
135 av. de Rangueil, 31077 Toulouse Cedex, France
e-mail : Olivier.Dorival@insa-toulouse.fr

2 : Airbus Group Innovations
12 rue Pasteur, 92152 Suresnes Cedex, France

Résumé

Partant d'une structure de mousse recouverte de trois couches de composite tissé, plusieurs structures sont obtenues par le biais de renforts continus (couches de composites internes) et/ou discrets (stitching) et sont soumises à des tests d'écrasement dynamique. Les structures possèdent la même forme extérieure, et le même nombre de couches composites externes. Lors des essais menés sur une tour de chute, un capteur d'effort et une caméra rapide sont utilisés pour extraire les courbes effort-déplacement et l'énergie absorbée. L'analyse des images de la caméra apporte également une compréhension des mécanismes d'endommagement subis par les éprouvettes.

Abstract

Starting from a foam structure wrapped with three layers of woven composite, several structures are obtained by means of continuous (internal composite layers) and/or discrete reinforcements (stitching) and are tested by dynamic crushing loading. The structures have the same external shape and the same number of external layers. During weight drop tower tests, a force sensor and a fast camera are used to get the force-displacement plots and the energy absorbed. Analysis of camera pictures also brings a deep understanding of the damage mechanisms inside the samples.

Mots Clés: Composite sandwich ; renforts discrets ; tests d'écrasement dynamique ; absorption d'énergie d'impact
Keywords: Sandwich composite; discontinuous reinforcements; dynamic crushing tests; impact energy absorption

1 Introduction

Tandis les composites sont devenus incontournables dans le domaine des transports en raison de leurs performances et notamment du gain en masse, la question de leur résistance à l'impact [1] reste un sujet sensible en particulier dans l'aéronautique et l'aérospatiale. Parmi les structures prometteuses pour l'absorption des chocs, les composites sandwich [2, 3] offrent un comportement hors-plan supérieur en rigidité et en résistance. De plus, la variété des techniques de renforts supplémentaires telles que le pinning [4] ou le stitching [5, 6] permettent d'améliorer encore la tenue de ce type de structures et créent des modes d'absorption d'énergie additionnels. Cependant les règles de conception permettant d'optimiser l'utilisation de ces techniques sont pour le moment quasi-inexistantes. La simulation numérique de ces phénomènes reste ainsi un enjeu majeur [7, 8] et l'étude de l'influence des renforts passe systématiquement par une campagne expérimentale.

La présente contribution présente une étude expérimentale menée sur des structures de type mousse-tissus, renforcées soit par des éléments continus tels que des tissus supplémentaires, soit par des éléments discrets de type stitches. Les différentes configurations possèdent la même forme extérieure, la même peau extérieure et la même densité de mousse. Elles ont été testées lors d'essais d'écrasement dynamique à 6.5 m/s menés sur une tour de chute. L'analyse des images prises par caméra rapide permet d'identifier des scénarios bien précis et de comprendre le rôle joué par les renforts. Les

courbes effort-déplacement offrent des critères quantifiés pour comparer les performances des différentes structures.

Cet article est organisé comme suit : la partie 2 présente le détail des différentes configurations et le protocole expérimental, la partie 3 présente les scénarios d'endommagement observés à partir des images de la caméra, la partie 4 fournit des éléments quantifiés pour comparer les différents concepts. Pour de plus amples détails, les lecteurs sont invités à consulter la référence [9].

2 Structures testées et protocole expérimental

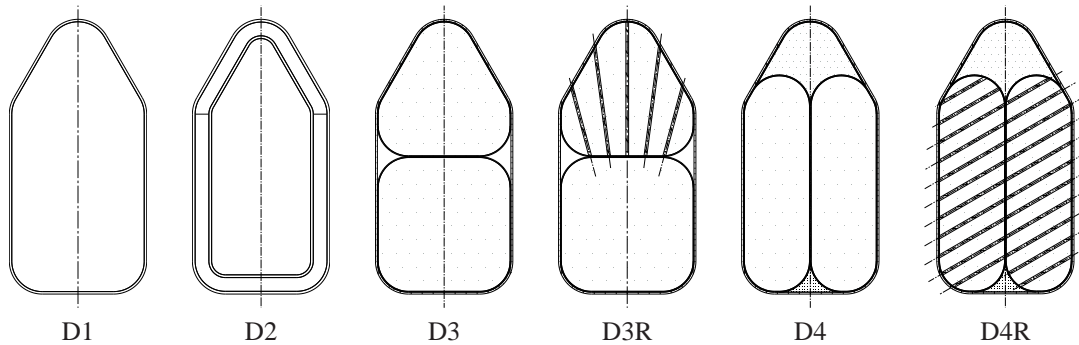


Figure 1: Les six configurations étudiées.

Les différentes configurations sont illustrées sur la Fig. 1. Elles possèdent toutes la même forme extérieure : longueur 100 mm, largeur 50 mm, épaisseur 24 mm. Elles possèdent également le même composite tissé extérieur : trois couches de braiding 2D composé de fibres aramides 12K injectées en résine HexFlow RTM6. Les fibres sont orientées à $\pm 45^\circ$. La mousse interne est une mousse polyméthacrylilide de densité 75 kg/m^3 . Cette forme extérieure de base est ensuite déclinée en six configurations différentes par le biais de renforts internes différents :

- la configuration D1 constitue la référence et n'est pas renforcée;
- la configuration D2 est renforcée par la présence dans la mousse interne de trois couches de braiding semi-imprégné de forme similaire à l'enveloppe extérieure. La partie extérieure de la mousse est formée par deux parties collées;
- la configuration D3 utilise l'idée d'insérer une paroi dans le sens transverse. Chacun des deux blocs de mousse est recouvert d'une couche de braiding, et l'ensemble est recouvert de deux couches de composite. Les vides latéraux sont comblés par des mèches unidirectionnelles injectées;
- la configuration D3R est basée sur la configuration D3 précédente, renforcée par des fibres de carbone 6K. Le bloc de mousse supérieur est pré-percé (1.5 mm) et deux mèches de fibres sont cousues dans chaque trou avec une orientation variant de 7.5° à chaque fois. La distance entre deux plans de couture est de 6 mm;
- la configuration D4 est basée sur l'idée de renforcer la structure par une paroi longitudinale. Pour ce faire, deux blocs de mousse de forme oblongue sont recouverts d'une couche de braiding, le tout complété par un bloc de mousse pour la partie supérieure. L'ensemble est recouvert de deux couches de braiding composite;
- la configuration D4R consiste à renforcer la configuration D4 précédente par stitching avec des mèches de carbone 6K orientées à $\pm 60^\circ$ et distantes de 6 mm dans le plan, ceci dans des plans distants de 6 mm.

L'essai d'écrasement dynamique est mené sur une tour de chute. Un impacteur de 4 kg avec une surface d'impact plate vient écraser les éprouvettes avec une vitesse d'impact de 6.5 m/s. Un capteur d'effort échantillonné à 20 kHz est monté sous la tête de l'impacteur afin d'obtenir l'effort d'impact.

Une caméra rapide cadencée à 20 kHz est également utilisée pour (i) obtenir des informations sur le scénario d'endommagement lors de l'essai, et (ii) obtenir le déplacement de l'impacteur grâce à une technique basée sur la corrélation d'image [10]. Les courbes fournies sont normalisées par rapport à la configuration de référence.

3 Résultats des tests : principaux scénarios d'endommagement

L'analyse des images prises par la caméra rapide permet d'identifier les principaux éléments de l'endommagement et le rôle joué par les renforts de chaque configuration dans la tenue des efforts et la dissipation de l'énergie d'impact, en relation avec la comparaisons des courbes force-déplacement.

3.1 Configuration D1

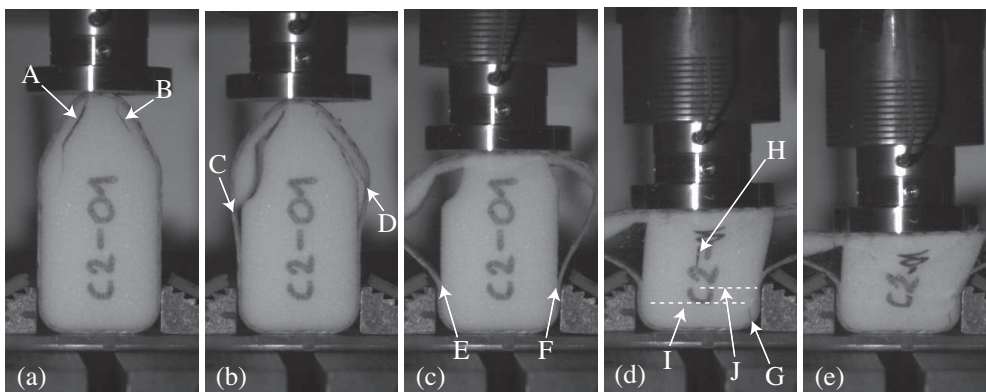


Figure 2: Images de l'essai d'écrasement sur l'éprouvette de référence D1.

Le scénario de référence pour l'écrasement dynamique est le suivant, voir les Fig. 2 et 4 :

- immédiatement après le contact, deux fissures (**A**) et (**B**) apparaissent dans la partie supérieure de la mousse;
- les fissures se propagent vers l'arrière et atteignent l'interface avec les peaux externes en (**C**) et (**D**). La propagation se prolonge sous la forme du délaminage entre la mousse et la peau. Dans le même temps, la mousse sous l'impacteur est condensée par écrasement;
- le délaminage se propage vers l'arrière et les peaux fléchissent vers l'extérieur tandis que la mousse continue d'être écrasée sous l'impacteur. Les délaminages sont stoppés par le bridage en (**E**) et (**F**);
- la flexion des peaux aboutit à une pliure complète. Une fissure importante dans le sens longitudinal est créée en (**H**) par la mousse condensée, qui a pris une forme triangulaire. Des fissures transverses dues au tassement apparaissent en (**I**) et (**J**);
- l'impacteur amorce le mouvement de retour, aidé par l'énergie élastique stockée.

On constate que les peaux fléchissent très rapidement puisque la connexion avec la mousse est faible. Les tissus ne servent qu'à rigidifier la structure et n'ont pas de rôle particulier dans la dissipation d'énergie, qui est principalement assurée par la densification de la mousse. Afin de quantifier la quantité de structure restante pour absorber d'autres impacts, ou des impacts plus énergétiques, on relève la profondeur d'écrasement : 59.6 mm.

3.2 Configuration D2

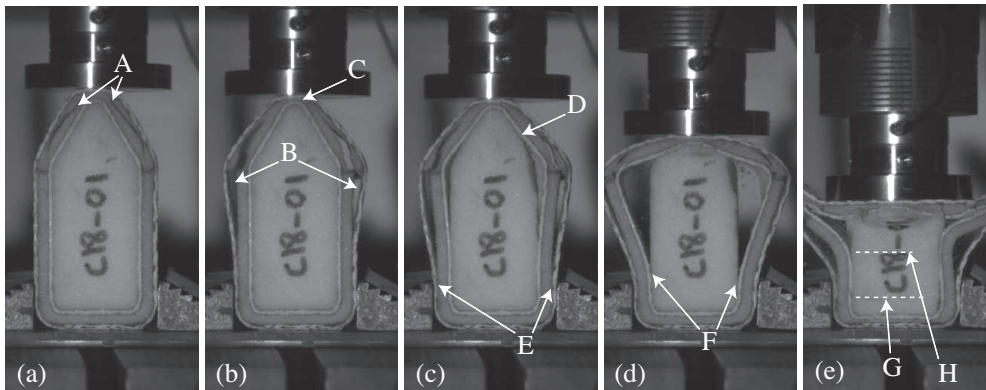


Figure 3: Images de l'essai d'écrasement sur l'éprouvette D2.

Le scénario identifié pour la configuration D2 est le suivant, voir les Fig. 3 et 4 :

- (a) comme pour l'éprouvette précédente, deux fissures apparaissent rapidement dans la mousse (**A**);
- (b) les fissures se propagent sous la forme d'un délaminage mousse/peaux (**B**). Ces fissures s'ouvrent et la mousse extérieure sous l'indenteur est complètement densifiée en (**C**). A ce moment, la mousse interne semble n'avoir subi aucun endommagement;
- (c) en (**D**), des délaminages entre la mousse interne et la peau interne facilitent la flexion vers l'extérieur des peaux internes et externes et de la mousse externe;
- (d) cette flexion permet à l'impacteur d'écraser la mousse interne;
- (e) en (**G**) et (**H**) des fissures transverses sont créées comme dans la configuration de référence. L'impacteur rebondit ensuite.

Le renfort consistant en une peau interne diminue modérément la distance d'écrasement, qui est de 50.1 mm. Le renfort interne apporte principalement de la raideur en bloquant la flexion des peaux externes, mais il ne participe pas à la dissipation, qui est assurée par le bloc interne de mousse, lequel est de section diminuée par rapport au concept de référence.

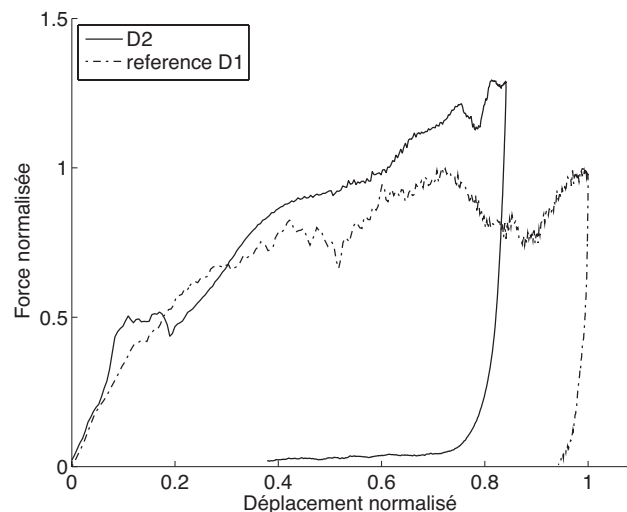


Figure 4: Courbes force-déplacement pour les configurations D1 et D2.

3.3 Configuration D3

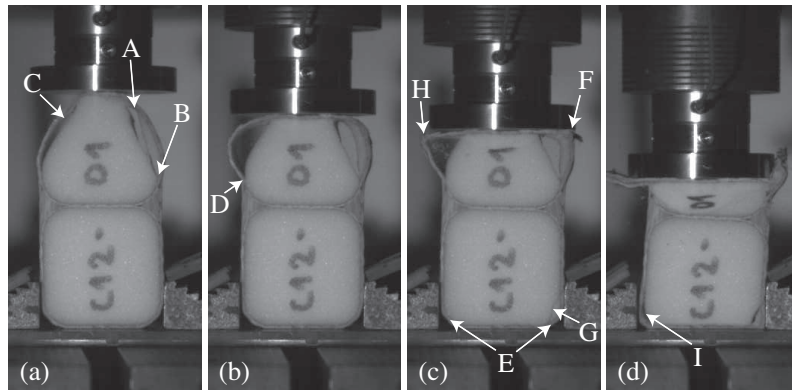


Figure 5: Images de l'essai d'écrasement sur l'éprouvette D3.

La configuration D3 montre le comportement suivant, voir les Fig. 5 et 7 :

- (a) en (A) une fissure se crée et se prolonge en délaminage en (B). Une seconde fissure apparaît en (C);
- (b) les délaminages correspondant permettent une flexion des peaux vers l'extérieur tandis que la mousse est écrasée sous l'impacteur. Les délaminages sont stoppés en (D) car le caisson avant est plus court que dans la configuration de référence;
- (c) la mousse au contact de la peau arrière s'effondre par tassement en (E). Les peaux à l'avant cassent par pliage en (F) et (H), tandis que le bloc de mousse avant continue de se densifier;
- (d) lorsque l'indenteur démarre son mouvement de retour, le caisson arrière est grandement épargné par l'endommagement, excepté sur les coins arrière qui se sont tassés contre le système de bridage.

L'utilisation d'une paroi transverse apporte deux effets positifs par rapport à la configuration de référence : en premier lieu la flexion des peaux est localisée sur la partie avant, ce qui rigidifie la structure, et en second lieu la paroi protège la mousse du caisson arrière, limitant ainsi l'écrasement à 41.8 mm et laissant une grande partie de l'éprouvette disponible pour absorber un surplus d'énergie.

3.4 Configuration D3R

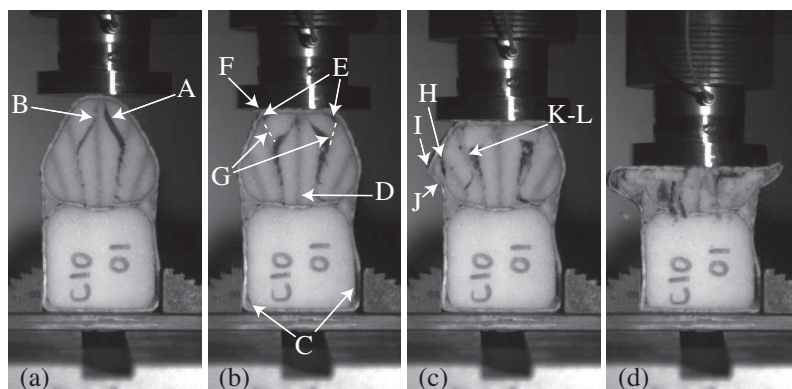


Figure 6: Images de l'essai d'écrasement sur l'éprouvette D3R.

Le renforcement de la configuration précédente par des fibres modifie le comportement à l'écrasement de la manière suivante, voir les Fig. 6 et 7 :

- (a) un tassement apparaît sur les coins arrière car les renforts discrets rigidifient la partie avant. Deux fissures (A) et (B) sont initiées sous la peau avant et suivent la direction des renforts. L'ouverture

de ces fissures reste limitée et aucun délaminage avec la peau n'apparaît, les renforts permettent de conserver la liaison peau/mousse;

- (b) la caisse avant reste relativement rigide grâce aux renforts, ce qui déforme la cloison transverse centrale. En **(D)**, l'un des renforts casse. Malgré la création de petites fissures **(G)** ou délaminages **(E)**, la structure du caisson avant est conservée grâce à la présence des renforts discrets, ce qui favorise l'écrasement de l'ensemble des éléments;
- (c) l'une des peaux plie en **(I)**, puis certains renforts flambent **(K)** et cassent immédiatement **(L)**;
- (d) lorsque l'impacteur commence son retour, la mousse arrière est principalement épargnée.

La présence de renforts discrets procure une rigidité grandement accrue ainsi qu'une grande résistance au délaminage et stabilise la structure du caisson avant. De nouveaux modes de dissipation résident dans la rupture des renforts, mais leur influence reste limitée : l'écrasement reste similaire à celui de la configuration D3, avec 41.0 mm.

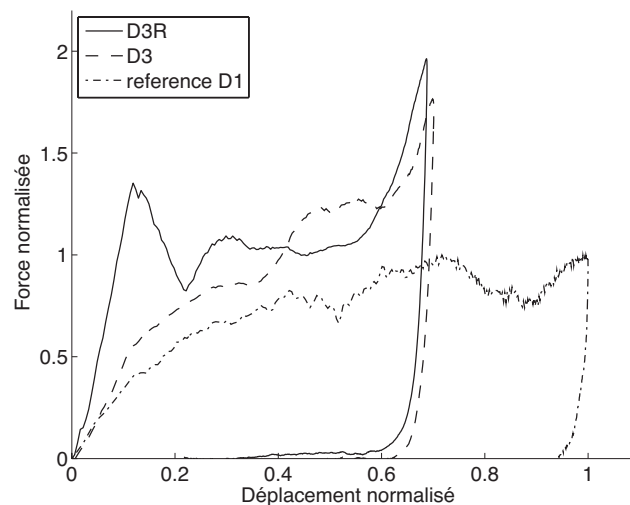


Figure 7: Courbes force-déplacement pour les configurations D3 et D3R.

3.5 Configuration D4

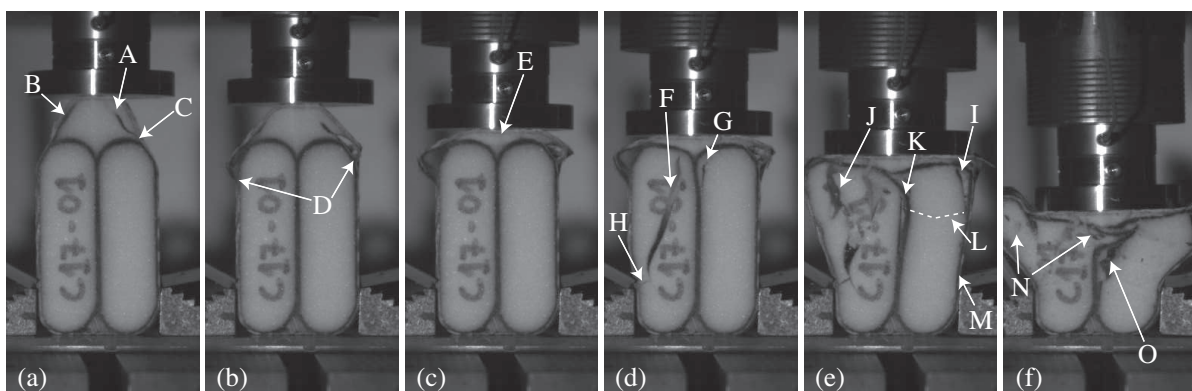


Figure 8: Images de l'essai d'écrasement sur l'éprouvette D4.

Le comportement de la configuration D4 montre les phénomènes suivants, voir les Fig. 8 et 10 :

- (a) une fissure **(A)** et un délaminage **(B)** apparaissent dans la partie avant de la mousse; la fissure donne un délaminage en **(C)**. Sous l'impacteur, la mousse est progressivement densifiée;
- (b) les délaminages se propagent mais sont rapidement stoppés en **(D)** par la liaison avec les caissons arrière. Les tissus tendent à fléchir;

- (c) l'impacteur poursuit son avancée et la mousse avant est complètement densifiée alors que les caissons arrière sont principalement épargnés;
- (d) une fissure importante apparaît en (F), se propage et atteint l'interface avec la peau en (H);
- (e) avec l'apparition d'autres fissures en (I) et (J), les parties de mousse subissent de la flexion (L). On note un délaminage le long de la partie centrale (K);
- (f) en (N) des fissures liées à la flexion de la mousse apparaissent et la cloison centrale flambe en (O). Le caisson perd sa stabilité et finit par être écrasé contre les brides.

La cloison centrale, au lieu d'apporter un renfort, "sépare" la mousse en deux. Avec les fissures, la mousse perd plus facilement sa stabilité et est écrasée de manière catastrophique, de sorte que la structure est incapable d'absorber tout l'impact sans s'écraser sur le système de bridage. La quantité de mousse encore non endommagée est estimée à 16 mm, soit une consommation de 84 mm, bien supérieure aux écrasements précédents.

3.6 Configuration D4R

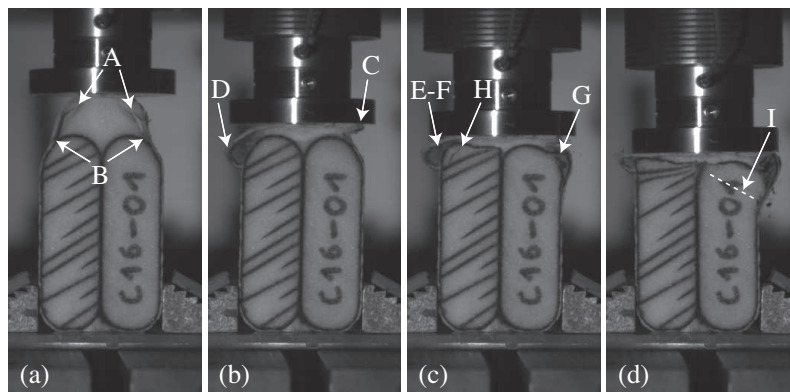


Figure 9: Images de l'essai d'écrasement sur l'éprouvette D4R.

Le renfort de la configuration précédente par stitching modifie grandement le comportement, voir les Fig. 9 et 10 :

- (a) deux fissures apparaissent dans la partie avant en (A) et sont rapidement stoppées à la liaison avec les caissons arrière en (B), tandis que la mousse est densifiée sous l'impacteur;
- (b) les peaux fléchissent de manière très localisée et plient ou cassent en (C) et (D). La mousse avant est complètement écrasée alors que les caissons arrière n'ont été que peu endommagés;
- (c) les déformations des caissons arrière apparaissent principalement sous l'indenteur. Les fissures et délaminages (E-G) restent localisés grâce aux stitches qui permettent de stabiliser l'ensemble mousse et peaux;
- (d) la densification de la mousse est localement orientée selon la direction des renforts discrets, et reste très localisée sous l'impacteur. Lorsque celui-ci amorce son retour, les caissons arrière restent très peu endommagés, et l'endommagement est localisé au voisinage de l'indenteur.

Comme dans la configuration D4, le flambage des peaux est rapidement contenu par les caissons arrière. Cependant dans D4R, la présence des stitches permet de conserver l'intégrité de la structure en contenant toute propagation de fissure. La rigidité initiale est principalement maintenue pendant tout l'écrasement, et l'écrasement final est très faible : 32.3 mm, ce qui est prometteur en vue de l'absorption d'impacts plus énergétiques.

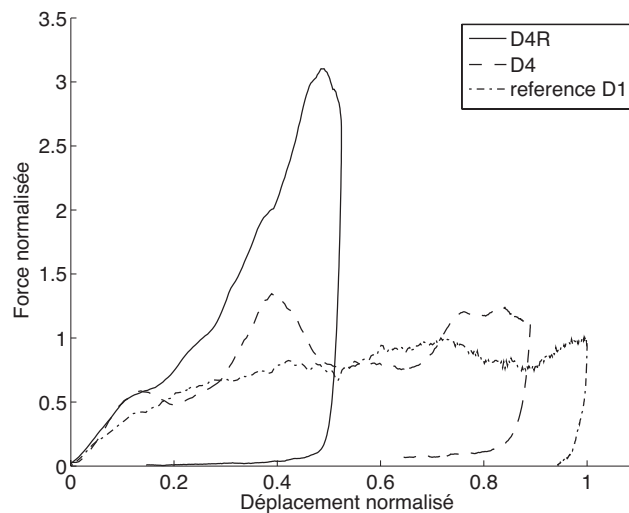


Figure 10: Courbes force-déplacement pour les configurations D4 et D4R.

4 Discussion

Les courbes force-déplacement permettent d'extraire les critères présentés dans le Tableau 1. La limite d'écrasement montre la profondeur d'avancée de l'impacteur. La "réserve", calculée comme le complément de la limite d'écrasement à la longueur du concept, correspond à la longueur de la structure épargnée lors de l'impact, et montre le potentiel pour absorber des chocs plus énergétiques. Le taux spécifique d'absorption est le rapport de l'énergie absorbée à la masse de la configuration considérée.

Configuration		D1	D2	D3	D3R	D4	D4R
Force max	(normalisée)	1	1.29	1.76	1.96	1.35	3.10
Force moyenne	(normalisée)	0.79	0.95	1.11	1.21	0.93	1.71
Taux spécifique d'absorption	(normalisé)	1	0.49	0.68	0.61	0.22	0.46
Limite d'écrasement	[m]	0.076	0.061	0.052	0.053	0.084	0.038
Réserve	[m]	0.024	0.039	0.048	0.047	0.016	0.062

Table 1: Résultats des tests d'écrasement.

L'étude des efforts montrent que toutes les configurations renforcées possèdent des efforts maximums et moyens supérieurs à la configuration de référence. D2 et D4 montrent une légère amélioration par rapport à D1, mais les configurations D3, D3R et D4R offrent des niveaux d'efforts très importants. Cependant le taux d'absorption spécifique de la configuration D1 reste de loin le plus grand : le gain en effort se paie au prix de la masse nécessaire pour renforcer la structure.

Un autre critère important est la capacité de la structure à absorber d'autres impacts, ou à absorber un impact plus énergétique. La "réserve" montre que sur ce plan, les configurations D1 et D2, dans lesquels l'unique source de dissipation est la densification de la mousse, offrent peu de potentiel. Rappelons que la configuration D4 n'a pas réussi à absorber tout l'impact sans s'écraser sur l'outillage. La configurations D3, qui permet de rigidifier la structure en évitant la flexion précoce des peaux extérieures, constitue une amélioration par rapport à la configuration de référence. Par rapport à D3, la configuration D3R ne semble pas d'un apport significatif en terme de réserve. Enfin la configuration D4R présente un potentiel de réserve très important, loin devant les autres configurations.

5 Conclusion

Les essais menés sur six configurations d'une structure mousse/peau composite tissée renforcée par des moyens variés ont permis la compréhension des scénarios d'endommagement impliqués lors d'un impact de type écrasement dynamique. Les éléments permettent de dresser des règles de conception

pour améliorer les performances face à ce type de chargement : éviter le flambage global de la peau extérieure, éviter l'effondrement chaotique de la mousse, ajouter des renforts pour stabiliser la structure et amener de nouveaux modes de dissipation. Parmi les différentes configurations, D3, D3R et surtout D4R montrent des performances très améliorées par rapport à la référence D1. Cependant ces performances sont obtenues au prix de la masse additionnelle des renforts et d'une complexité accrue en terme de fabrication. Il faut cependant mentionner que l'utilisation de ces renforts peut vraisemblablement être optimisée moyennant une étude sur l'influence de la densité et de la taille des éléments additionnels.

References

- [1] S. Abrate, Impact on composite structures. *Cambridge University Press*, 1998.
- [2] J. Zhou, M. Z. Hassan, Z. Guan, W. J. Cantwell, The low velocity impact response of foam-based sandwich panels. *Composites Science and Technology*, Vol. 72(14), pp. 1781-1790, 2012.
- [3] M. Z. Hassan, W. J. Cantwell, The influence of core properties on the perforation resistance of sandwich structures - An experimental study. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43(8), pp. 3231-3238, 2012.
- [4] A. Nanayakkara, S. Feih, A. P. Mouritz, Experimental analysis of the through-thickness compression properties of Z-pinned sandwich composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42(11), pp. 1673-1680, 2011.
- [5] B. Lascoup, Z. Aboura, K. Khellil, M. Benzeggagh, Impact response of three-dimensional stitched sandwich composite. *Composite Structures*, Vol. 92(2), pp. 347-353, 2010.
- [6] J. Zhou, Z. W. Guan, W. J. Cantwell, Y. Liao, The energy-absorbing behaviour of foam reinforced with composite rods. *Composite Structures*, Vol. 116(0), pp. 346-356, 2014.
- [7] D. Coutellier, P. Rozycki, Multi-layered multi-material finite element for crashworthiness studies. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 31(8), pp. 841-851, 2000.
- [8] P. Navarro, J. Aubry, J.-F. Ferrero, S. Lemaire, P. Rauch, Semi-continuous approach for the modeling of thin woven composite panels applied to oblique impacts on helicopter blades. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43(6), pp. 871-879, 2012.
- [9] O. Dorival, P. Navarro, S. Marguet, C. Petiot, M. Bermudez, D. Mesnagé, J.-F. Ferrero, Experimental study of impact energy absorption by reinforced braided composite structures: dynamic crushing tests. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 78, pp. 244-255, 2015.
- [10] J.-C. Passieux, P. Navarro, J.-N. Périé, S. Marguet, J.-F. Ferrero, A digital image correlation method for tracking planar motions of rigid spheres: application to medium velocity impacts. *Experimental Mechanics*, Vol. 54(8), pp. 1453-1466, 2014.