

Impact sur structures sandwich composites pour application de blindage aéronautique

Amélie Kolopp, Samuel Rivallant, Christophe Bouvet

▶ **To cite this version:**

Amélie Kolopp, Samuel Rivallant, Christophe Bouvet. Impact sur structures sandwich composites pour application de blindage aéronautique. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.70. hal-00597980

HAL Id: hal-00597980
https://hal.science/hal-00597980

Submitted on 3 Jun 2011

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.

Impact sur structures sandwich composites pour application de blindage aéronautique

Impact Testing of Composite Sandwich Structures for Aircraft Armor Applications

Amélie Kolopp[1], Samuel Rivallant[1] et Christophe Bouvet[1]

1 : Université de Toulouse ; INSA, UPS, Mines Albi, ISAE ; ICA (Institut Clément Ader)
ISAE (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace), 10 avenue Edouard Belin – BP54032 – 31055 Toulouse CEDEX 4.
e-mail : amelie.kolopp@isae.fr, samuel.rivallant@isae.fr, christophe.bouvet@isae.fr

Résumé

Une étude expérimentale d'impact à haute vitesse est réalisée sur des structures sandwich afin d'identifier et d'optimiser des solutions de blindage pour structures aéronautiques. Un projectile sphérique de 127g est lancé à 120 m/s et l'énergie initiale moyenne avoisine 1kJ. Le choix de la peau avant du sandwich s'avère primordial pour éviter la rupture. Deux candidats ont été identifiés, à savoir des peaux aluminium et un assemblage de tissus secs en fibres de Kevlar cousus dans l'épaisseur. Les mécanismes d'absorption d'énergie et d'endommagement sont étudiés et comparés pour les deux solutions identifiées. Un début d'optimisation est effectué sur la base de non rupture des structures à masse et déformation arrière minimales.

Abstract

Sandwich structures have been subjected to high velocity impacts to identify and optimize armor structures for aircraft applications. A spherical projectile of 127 g is launched at a velocity of 120 m/s and the initial kinetic energy reaches 1 kJ. Results show the influence of the front skin to avoid the perforation of the structure. Two candidates have been identified: aluminum skins and the superposition of dry Kevlar fabric plies stitched together. The mechanisms related to energy absorption and damage are studied and compared for the two types of skins. Sandwich structures are optimized based on the criterion of no-perforation for a minimum weight and back deformation.

Mots Clés : Impact haute vitesse, Structure sandwich, Composite
Keywords : High velocity impact, Sandwich structure, Composite

1. Introduction

Les structures sandwich présentent un bon rapport de rigidité sur masse, c'est la raison pour laquelle on les retrouve dans de nombreuses applications. Des études montrent que dans certaines conditions, ces structures présentent également de bonnes capacités d'absorption d'énergie, ce qui en fait des candidats potentiels pour des protections contre les ondes de choc ou des impacts [1, 2]. De plus, ce type de structure peut répondre à des spécifications multifonctionnelles en tirant parti des choix de combinaison de matériaux et d'architectures : protection acoustiques, thermiques, à l'impact…

Dans le secteur aéronautique, les structures sandwich sont pressenties en tant que protection du fuselage. Ce dernier est susceptible d'être endommagé par des projectiles durs (débris moteurs ou glaçons), projetés à des vitesses comprises entre 200 et 400 m/s. Les énergies d'impact considérées sont de l'ordre de 10 kJ.

Cette étude vise à optimiser des structures sandwich capables de résister à des impacts de 120 m/s et des énergies de 1 kJ, ce qui correspond aux limites du dispositif expérimental. Le blindage doit résister à l'impact sans perforation de la peau avant, pour une masse et un encombrement minimaux (épaisseur de la structure plus déformations résiduelles).

Il existe un certain nombre d'études sur les impacts à haute vitesse, mais peu s'appliquent au domaine vitesse/énergie considéré ici. Dans le secteur balistique (400 m/s, 100J), les solutions de protection étudiées intègrent généralement des tissus composites secs ou résinés [4, 5]. Dans le secteur naval, les protections contre les ondes de choc sont typiquement des sandwichs avec peaux métalliques et cœurs en mousse ou nid d'abeille [2].

2. Etude expérimentale

2.1 Moyens d'essais et conditions expérimentales

Des essais d'impact frontal sont réalisés à l'aide d'un canon à gaz comprimé sur des éprouvettes carrées de 200 à 400 mm de côté (Fig. 1). Un projectile sphérique en acier durci de 30 mm de diamètre et de 127 g est lancé à 120 m/s. Les échantillons sont simplement maintenus à l'arrière sur un support avec ouverture carrée de 170 mm de côté. La condition de maintien sans encastrement est privilégiée afin d'avoir un comportement plus représentatif d'une structure de grande taille. Les mesures sont effectuées à l'aide d'une caméra rapide à une fréquence de 75000 images par seconde. Un système de marquage est réalisé sur le projectile afin de visualiser sa position à la caméra.

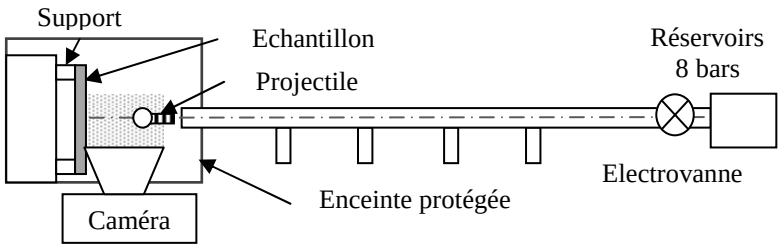


Fig. 1. Principe de fonctionnement du canon et conditions d'essais

L'instrumentation de ce type d'essai est limitée par les performances requises pour les capteurs. Il est possible d'instrumenter le projectile avec un capteur d'effort ou un accéléromètre, mais cette méthode présente des limites : vitesses d'impact inférieures à 50 m/s et pertes de signal provoquées par la rupture fréquente des fils [3]. De plus, la mesure du déplacement à la caméra rapide ne permet pas, dans la gamme considérée, de remonter à l'évolution de l'accélération à cause de bruits de mesure significatifs. L'analyse des essais réalisés est donc évaluée au travers des mesures de position du projectile, donnant accès à des vitesses et énergies instantanées (Fig. 2).

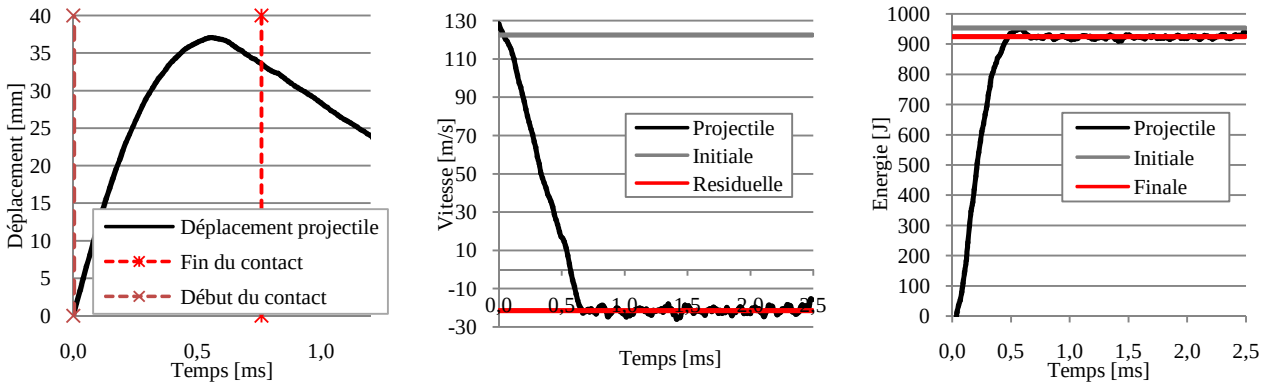


Fig. 2. Exemple de mesures réalisées : mouvement du projectile et évolution de l'énergie absorbée sans perforation

A partir des données d'essais, on définit la vitesse résiduelle du projectile et l'énergie absorbée par l'échantillon (Tab. 2). La vitesse résiduelle est calculée à partir de la fin du contact entre la bille et l'échantillon et traduit la vitesse après perforation (valeurs positives) ou la vitesse de rebond (valeurs négatives).
L'énergie absorbée est définie comme la perte d'énergie cinétique du projectile, à laquelle on retire les énergies résiduelles du projectile (rebond ou perforation) et de l'échantillon.
L'énergie cinétique résiduelle de l'échantillon est négligée car inférieure à 10 J pour les essais réalisés. L'expression simplifiée de l'énergie absorbée s'écrit donc :

$$E_{abs} = \frac{1}{2} m_{bille} \left(V_{initiale}^2 - V_{résiduelle}^2 \right)$$

2.2 Configurations de sandwich testées

Des essais préliminaires ont souligné l'influence du choix de la peau sur la perforation du sandwich. L'étude expérimentale est ainsi réalisée en plusieurs étapes :

- Etude 1 : identification de structures non perforées à cœur et peau arrière fixés
- Etude 2 : effet du cœur sur la structure pour un choix de peaux donné
- Etude 3 : optimisation des structures en termes de masse

Le cœur utilisé dans les études 1 et 3 est un nid d'abeille en aluminium de 67 kg/m^3 de 10 ou 20 mm d'épaisseur.
Les peaux composites sont fabriquées avec un sergé aramide (220 g/m^2), à l'exception du cas 1E qui est un taffetas associant des fibres de carbone et d'aramide (170 g/m^2). Les plis sont superposés en symétrie miroir avec alternance d'orientations à 0/90° et ±45°.
L'assemblage des plis de tissus secs est réalisé par couture à l'aide d'un fil aramide. On réalise un quadrillage de 10 mm de côté sur toute la surface de l'échantillon. Les peaux et le cœur du sandwich sont assemblés à l'aide d'un film de colle. Le détail des structures testées est donné ci-après (Tab. 1).

REF.	PEAU AVANT	EPAISSEUR [mm]	PEAU ARRIERE	EPAISSEUR [mm]	EPAISSEUR CŒUR [mm]	DIMENSIONS EPROUVETTE [mm]	MASSE SURFACIQUE [kg/m^2]
1A	Aluminium 5086	2	Aluminium 5086	2	10	200	11.75
1B	Aluminium 2017	2	Aluminium 2017	2	10	200	12.33
1C	Tissu Kevlar résiné	3 (16 plis)	Aluminium 5086	2	20	200	13.38
1D	Tissu Kevlar sec	3 (16 plis)	Aluminium 5086	2	10	200	10.2
1E	Tissu Carbone-Kevlar sec	3 (16 plis)	Aluminium 5086	2	10	200	9.35
2A	Aluminium 5086	2	Aluminium 5086	2	/	200	10.95
2B	Aluminium 5086	2	Aluminium 5086	2	20	200	12
3A	Aluminium 5086	2	Aluminium 5086	1	/	400	8.26
3B	Aluminium 5086	1	Aluminium 5086	1	/	400	5.52
3C	Tissu Kevlar sec	1.5 (8 plis)	Aluminium 5086	2	10	200	8.28

Tab. 1. Configurations de sandwichs testés

3. Résultats expérimentaux

La durée du contact entre la bille et l'échantillon est comprise entre 500 µs (cas de perforation rapide de la peau avant puis de la structure) et 1 ms. On mesure la déformation résiduelle des peaux des sandwichs après impact par stéréo-corrélation. La mesure des profils n'est effectuée que sur les éprouvettes non perforées. On définit l'indentation maximale comme la déformation maximale de la peau arrière (sous le projectile) considérée par rapport aux appuis.

REF.	V_{INI} [m/s]	E_{INI} [J]	V_{RES}[m/s]	E_{ABS} [J] / % E_{INI}	PERFORATION / REBOND	INDENTATION MAX [mm]
1A	120	914	-7	914 / 99.9%	R	24.7
1B	**125**	**990**	**80**	**580 / 58.5%**	**P**	-
1C*	**120**	**914**	**-**	**-**	**P**	-
1D	127	1015	-13	1004 / 98.9%	R	39.3
1E	127	1021	-4	1017 / 99.7%	R	47.3
2A	127	1018	-9	1011 / 99.3%	R	31.5
2B	117	867	-7	863 / 99.6%	R	28
3A	123	954	-21	925 / 96.9%	R	30.7
3B	**122**	**946**	**66**	**664 / 70.2%**	**P**	-
3C	**126**	**1199**	**0**	**1199 / 99.9%**	**P****	-

Tab. 2. Résultats des essais d'impact

* Manque de données expérimentales
** Cas particulier de rupture du nid d'abeille et de la peau arrière sans rupture de la peau avant.

4. Influence des peaux et du cœur du sandwich sur les performances à l'impact

4.1 Résultats des sandwichs réalisés à partir de peaux aluminium (Etude 1)

Les essais 1A et 1B étudient l'effet de la nuance d'aluminium des peaux (respectivement 5086 et 2017). On observe que la structure 1B est totalement perforée (Fig. 3b). La rupture est provoquée par cisaillement hors plan et l'endommagement est très localisé (rayon de la zone : 1.2 fois celui du projectile). Puisqu'un petit volume de matière participe de manière effective à l'impact, l'énergie absorbée par la structure est faible (580 J soit 59% de l'énergie initiale).
La configuration 1A montre des résultats différents. D'une part, la structure n'est pas perforée, et on peut observer une large zone de plastification sur les peaux avant et arrière (Fig. 3a). L'énergie absorbée est supérieure car les efforts sont répartis sur une surface importante (863 J, soit 99.6% de l'énergie cinétique initiale).
A partir de ces observations, on définira dans cette étude l'effet de structure comme la réaction globale d'une peau ou d'un sandwich lors d'un impact (à opposer à un comportement uniquement local comme pour le cas 1B).
Des résultats comparables au cas 1B sont également observés avec des peaux en aluminium 2024. Les caractéristiques mécaniques des ces trois alliages sont fournies ci-après (Tab. 3). Au vu de ces données, il semble judicieux de choisir un aluminium à écrouissage bas afin d'augmenter les surfaces plastifiées et avec une déformation à rupture importante pour retarder voire limiter la perforation de la peau. Ces analyses doivent être cependant nuancées car elles ne prennent pas en compte de l'effet de la vitesse de déformation sur les propriétés.

NUANCE	E [GPa]	R0.2 [MPa]	Rm [MPa]	A%
2017	74	245	390	15
2024	70	377	500	16
5086	73	145	342	19

Tab. 3. Caractéristiques mécaniques des aluminiums

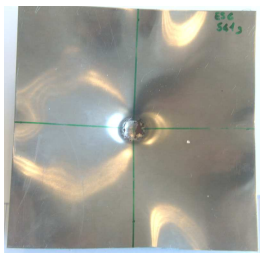
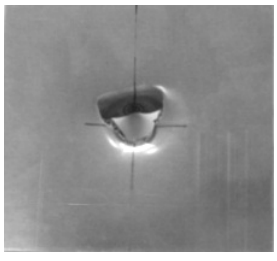
a)  *b)* 

Fig. 3. Face avant après impact : a) 1A; b) 1B

L'observation de la configuration 1A après impact montre que le cœur est fortement sollicité en compression sous le projectile et en cisaillement hors plan autour de la zone d'impact (Fig. 4.). On note la présence de zones de rupture du film de colle en cisaillement sous le projectile et en traction aux bords de l'échantillon de par la déformation de la peau avant.

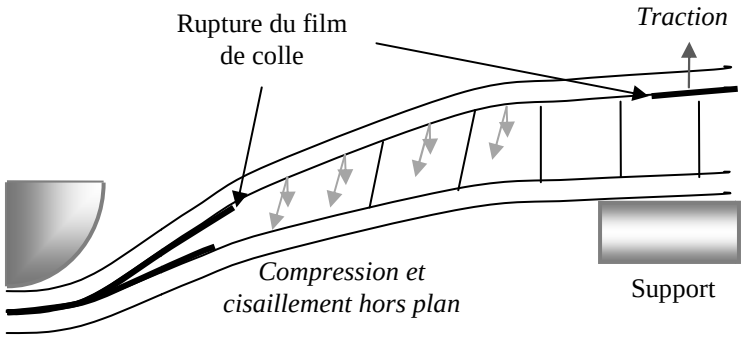


Fig. 4. Profil de déformation des sandwichs avec peaux aluminium après impact

4.2 Résultats des sandwichs réalisés à partir de peaux composites (Etude 1)

Des essais sur structures avec peau avant en tissus secs ou résinés sont réalisés. Le sandwich avec peau avant résinée (cas 1C) est entièrement perforé (Fig. 5a), ce qui n'est pas le cas des structures en tissus secs avec un même nombre de plis et une même stratification (Fig. 5b et Fig. 5c). Des différences significatives sont ainsi observées en termes d'énergies absorbées et de mécanismes d'endommagement. Sur l'échantillon 1C, on observe une décohésion des fibres et de la matrice, la rupture de la matrice en cisaillement hors plan et des fibres en traction sous le projectile. Des observations similaires ont été réalisées avec l'association Kevlar/époxy (même nombre de plis et stratification). La présence de résine augmente la rigidité de la peau et empêche la déformation du motif et le glissement des mèches. Les efforts d'impact sont peu répartis et la zone endommagée reste très localisée (Fig.5a).

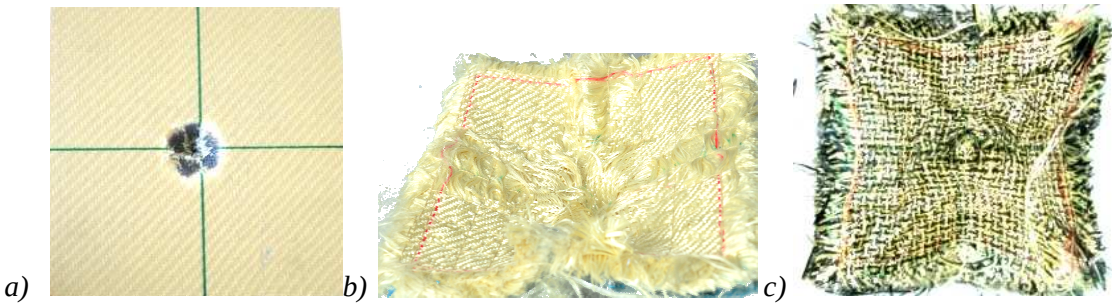


Fig. 5. Face avant après impact : a) 1C; b) 1D; c) 1E

Les échantillons 1D et 1E présentent des résultats comparables en termes d'énergies absorbées et de mode d'endommagement. Contrairement au test 1C, on n'observe pas de rupture des fibres, mais un phénomène de glissement des mèches dites principales, c'est-à-dire situées directement sous le projectile. Le déplacement atteint environ 21 mm pour les tests 1D et 1E, et il provoque une zone plus ou moins importante de déformation du motif initial. Tout comme les structures en aluminium, on observe un écrasement du nid d'abeille sur une large surface et des déformations résiduelles sur la peau arrière.

On peut supposer la présence de plusieurs mécanismes de dissipation d'énergie dans les tissus secs :

- Au niveau des mèches principales : énergie dissipée par frottement inter-mèches et inter-plis provoqué par la mise en mouvement et le glissement des mèches.
- Au niveau des mèches dites secondaires (en contact avec les mèches principales mais pas avec le projectile) : énergie dissipée par frottement inter-mèches et inter-plis provoquée par la déformation du motif de tissage. Dans la littérature, les effets d'ondulation des mèches dus au tissage, ainsi que les phénomènes de frottement semblent avoir un effet bénéfique notable sur les performances à l'impact. Cependant, le détail de ces mécanismes est encore mal compris et des limitations apparaissent sur les tendances générales évoquées [4,6].

- Au niveau des coutures : énergie dissipée lors de la rupture des points de couture autour de la zone d'impact.

On peut également noter que les tissus secs transmettent les efforts de manière répartie au reste de la structure, ce qui favorise l'absorption d'énergie.

4.3 Effet du cœur du sandwich (Etude 3)

Les essais 2A, 2B et 1A évaluent l'influence de l'épaisseur du cœur. Trois épaisseurs sont testées avec des peaux identiques (2 mm de 5086 avant et arrière) : configuration sans cœur (2A), 10 mm (1A) et 20 mm (2B). La configuration 2B a été testée pour 2 énergies d'impact initiales : 867 J et 996 J (vitesses respectives de 117 et 125 m/s). Pour la plus faible énergie, on observe un début de rupture de la peau avant du sandwich (Fig. 6) et à plus haute énergie, une perforation totale de la structure. Ce résultat n'est pas retrouvé avec les configurations 1A et 2A alors que les énergies initiales sont comparables à l'énergie maximale du cas 2B.

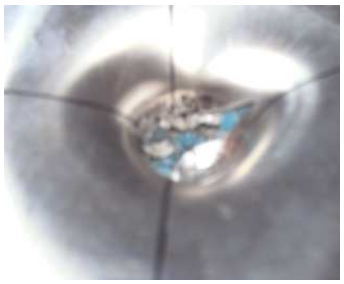
a)  *b)* 

Fig. 6. Eprouvettes après impact - 2B : a) face avant (énergie basse); b) zoom face avant

Ces observations montrent que l'épaisseur du cœur joue un rôle sur la rupture des peaux. Il est à noter que pour l'essai 2A, les deux peaux sont en contact et réagissent ainsi de manière simultanée à l'impact. Dans les structures sandwich, l'endommagement est d'abord local : on observe une déformation de la peau avant et l'écrasement du cœur sous le projectile. Si la peau avant rompt pendant cette première phase, les deux peaux s'endommagent successivement et les effets de structure n'apparaissent pas, diminuant ainsi l'énergie absorbée. Ce phénomène est observé à partir d'une épaisseur de 20 mm de nid d'abeille pour l'aluminium considéré.

5. Comparaison et optimisation des structures

5.1 Etude d'optimisation des peaux en termes de masse

On cherche à optimiser les structures identifiées précédemment afin qu'elles répondent au critère de non rupture à masse minimale. Des essais sur assemblages de deux peaux de 2 et 1 mm ont été réalisés (tests 2A et 3B). Une configuration intermédiaire associant une peau de 2 mm à l'avant et de 1 mm à l'arrière a également été définie (test 3A). Les résultats montrent que la structure 3B est entièrement perforée et qu'on est en limite de rupture sur le cas 3A avec début de rupture de la peau arrière (Fig. 7b). On peut observer une couronne de rupture en cisaillement hors plan de 16 mm de diamètre pour une énergie initiale de 954 J. Ce même essai a été réitéré pour une énergie initiale de 913 J mais aucun phénomène de rupture n'a été observé pour cette énergie.

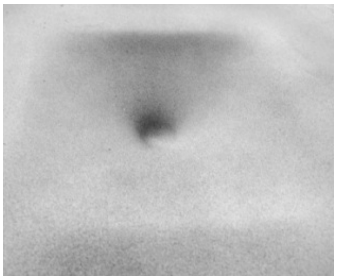
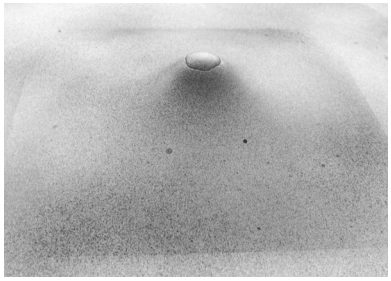
a)  *b)* 

Fig. 7. Echantillon après impact – Cas 3A : a) face avant; b) face arrière

Une structure identique au cas 1D a été testée avec un assemblage de 8 plis de tissus secs au lieu de 16. On observe que le nid d'abeille et la peau arrière sont perforés mais pas de la peau avant qui a retenu le projectile dans une poche constituée par les mèches principales (Fig. 8b). On voit nettement le déplacement des mèches principales qui ont glissé sur quasiment toute leur longueur, soit 150 mm.

a)  *b)* 

Fig. 8. Echantillon après impact – Cas 2C : a) face avant; b) face arrière

Il y a une relation directe entre la non-perforation observée et la capacité de glissement des fibres liée à leur longueur. Or, on définit la taille de l'échantillon et les conditions limites de telle sorte que le comportement reste représentatif d'une structure réelle. Ici, la taille de l'échantillon influence de manière directe la perforation, ce qui est un effet indésirable. Plusieurs solutions sont envisagées et en cours d'étude pour s'affranchir de ce phénomène.

5.2 Comparaison des structures et tendances dégagées

Les structures sandwich sont comparées sur la base du critère de non perforation à masse et déformation arrière minimales (Fig. 9). Seules les structures non perforées ou en limite de perforation sont évaluées. Les critères choisis dépendent de l'énergie initiale de l'essai et ne correspondent pas aux performances potentielles maximales de la structure. Les valeurs d'énergie rapportée à l'indentation maximale ont été multipliées par un coefficient afin de pouvoir les afficher au même niveau que les données d'énergie initiale et d'énergie rapportée à la masse.
Les configurations optimales en termes d'énergie rapportée à la masse du sandwich sont les structures avec peaux en tissus secs de 8 plis, puis les peaux aluminium seules (2 et 1 mm d'épaisseur avant et arrière) et enfin les peaux en tissus secs de 16 plis. Les deux premières solutions correspondent à des cas proches de la perforation, donc à des limites hautes en énergie absorbée. Les sandwichs en tissus secs sont meilleurs que ceux avec peaux aluminium en termes d'énergie absorbée rapportée à la masse. Ils sont cependant moins bons sur le critère d'énergie rapportée à l'indentation maximale car ils se déforment plus dans l'épaisseur (Fig. 10b).

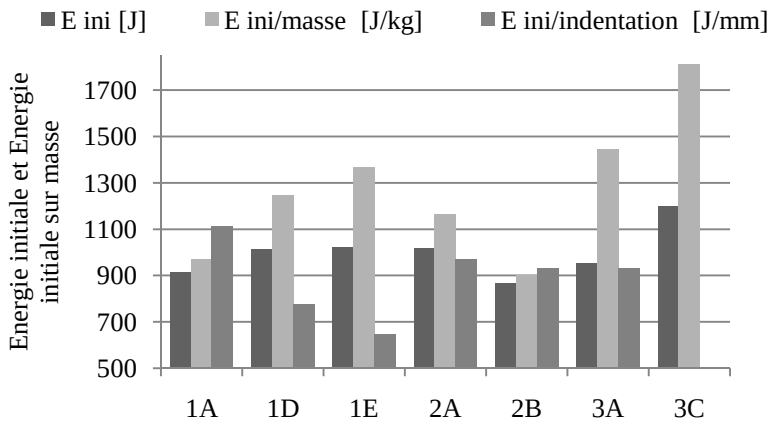


Fig. 9. Comparaison des énergies absorbées et rapportées à la masse et à l'indentation maximale

On peut comparer l'effet de l'épaisseur du cœur sur le profil des échantillons après impact (Fig. 10.a). Les plaques aluminium seules sont plus déformées que les sandwichs (+30% d'indentation). Les structures avec 10 et 20 mm de cœur ont un profil quasiment identique en face arrière. Pour les 3 cas, on note que l'épaisseur sous le projectile est d'environ 4 mm, ce qui correspond à l'épaisseur des peaux seules. En effet, le nid d'abeille est totalement comprimé, décollé des peaux puis expulsé hors de la zone indentée pendant l'impact.

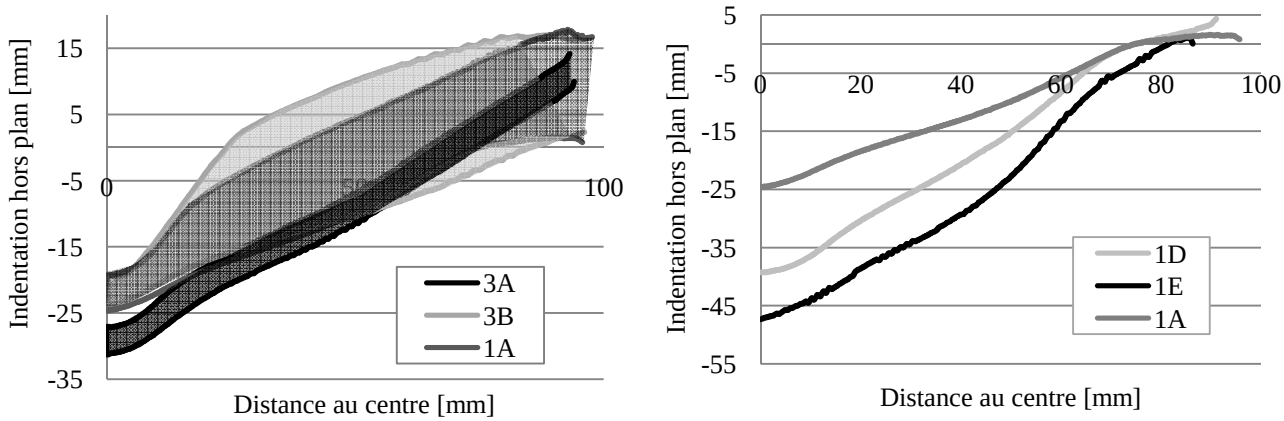


Fig. 10. Comparaison des profils après impact – a) Profil des sandwichs b) Profils des peaux arrières

On peut remarquer une déformation importante à l'arrière des structures assemblées avec des tissus secs (Fig. 10b). Les hausses sont de l'ordre de 1.5 à 2 fois l'indentation d'un sandwich aluminium. Cette différence peut s'expliquer au niveau des mécanismes d'absorption identifiés dans les tissus secs (glissement et étirement des mèches, déformations du motif, frottements et rupture des coutures). Ces phénomènes apparaissent suite à la sollicitation des mèches principales et dépendent donc de l'enfoncement du projectile dans le tissu. C'est la raison pour laquelle il est préférable de coupler ce type de peau avant avec un cœur de forte épaisseur (typiquement 20 à 30 mm) afin d'éviter d'endommager la peau arrière.
Le sandwich avec assemblage de plis en Carbone-Kevlar présente une plus forte indentation (+20%) que l'assemblage en Kevlar seul. Cet effet peut être associé à la différence de motif ou à la nature des fibres utilisées.

6. Conclusions

Les essais expérimentaux ont permis d'identifier des solutions de peau avant répondant au critère de non rupture pour une configuration sandwich donnée : 2 mm d'aluminium 5086 et 16 plis cousus dans l'épaisseur de tissus secs (Kevlar ou hybride).

Les résultats semblent orienter le choix d'aluminium vers des aluminiums ductiles à écrouissage bas et haute déformation à rupture. Cependant, il est probable que d'autres paramètres liés aux effets de vitesse interviennent sur cette tendance. Le cœur associé aux peaux aluminium ne doit pas dépasser une épaisseur critique afin de favoriser un effet de structure global plutôt qu'un endommagement successif et localisé des peaux en cisaillement hors plan. Une limite de 20 mm de nid d'abeille a été identifiée pour des peaux en 5086 de 2 mm.
Des essais intégrant des matériaux composites en peau avant indiquent que la présence de résine diminue les performances à l'impact. En effet, elle rigidifie l'assemblage, empêche le glissement des mèches et localise l'endommagement. Au contraire, l'assemblage de tissus secs cousus dans l'épaisseur apparaît comme une solution prometteuse en termes d'énergie absorbée rapportée à la masse. Il est préférable de les associer à un cœur de forte épaisseur (20-30 mm) car ils se déforment beaucoup plus hors du plan que des peaux en aluminium.
Cette étude expérimentale sera complétée par un modèle numérique sur sandwichs tout aluminium afin de définir les paramètres clés au niveau du matériau et de la structure. De plus, des essais de caractérisation sur tissus secs cousus sont prévus afin de mieux comprendre les mécanismes en jeu et d'alimenter un modèle numérique.

Remerciements
Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de l'ANR MANSART (Matériaux sANdwichS ARchitTecturés) portant sur l'étude et le développement de matériaux multifonctionnels.

Références

[1] W. GOLDSMITH, G. WANG, K. LI, D. CRANE, « Perforation of cellular sandwich plates ». *Int. J. of Impact Eng.*, Vol.19, pp. 361-379, 1997.
[2] D.D. RADFORD, N.A. FLECK, V.S. DESHPANDE, « The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading » *Int. J. of Impact Eng.*, Vol.32, pp. 968-987, 2006.
[3] D. STARRAT, T. SANDERS, E. CEPUS, A. POURSARTIP, R. VAZIRI, « An efficient method for continuous measurement of projectile motion in ballistic impact experiments ». *Int. J. of Impact Eng.*, Vol. 24, pp. 155-170, 2000.
[4] M. KARAHAN, A. KUS, R. EREN, « An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics ». *Int. J. of Impact Eng.*, Vol. 35, pp. 499-510, 2008.
[5] C.Y. THAM, V.B.C. TAN, H.P. LEE, « Ballistic impact of a KEVLAR helmet: Experiment and simulations ». *Int. J. of Impact Eng.*, Vol. 35, pp. 304-318, 2008.
[6] Y. DUAN, M. KEEFE, T.A. BOGETTI, B.A. CHEESEMAN, B. POWERS, « A numerical investigation of the influence of friction on energy absorption by a high-strength fabric subjected to ballistic impact » . *Int. J. of Impact Eng.*, Vol. 32, pp. 1299-1312, 2006.