

## Développement et caractérisation d'éco-structures composites à base de bois

### *Development and characterization of wood based eco-structures composites*

Romain Guélou, Florent Eyma, Arthur Cantarel, Bruno Castanié, Christophe Bouvet, John Susainathan

Institut Clément Ader, Groupe MSC  
Université de Toulouse, ISAE-SUPAERO, INSA, IMT MINES ALBI, UTIII, CNRS  
3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse  
e-mail : romain.guelou@iut-tarbes.fr

### Résumé

Limiter les émissions de carbone est un objectif commun à toutes les industries du transport. Une façon de répondre à cette attente consiste à introduire des matériaux de plus en plus légers avec des propriétés spécifiques élevées tels que les matériaux composites. Les structures composites à base de bois semblent être de bons candidats si l'on considère à la fois les aspects environnementaux, les notions de sécurité, et les capacités d'absorption d'énergie. Ainsi, plusieurs configurations de sandwichs avec âme en contreplaqué ont été caractérisées à l'impact afin de quantifier leur capacité d'absorption d'énergie. Une comparaison de ces résultats est proposée avec les structures sandwichs utilisées actuellement dans l'industrie aéronautique de manière à pouvoir identifier le potentiel de ces nouvelles structures à base de bois. Nous avons analysé leurs propriétés résiduelles via un essai de compression après impact. Au final, plusieurs structures présentant un bon compromis entre résistance résiduelle et rigidité ont été identifiées pour remplacer les structures sandwichs actuelles. Sur la base de leur comportement à l'impact et des modèles numériques développés, la fabrication d'une crash box utilisant des matériaux sandwich à base de bois devrait être envisagée dans les années à venir.

### Abstract

Low carbon emission is a shared goal of all transportation industry. One way to match this expectation consists in the introduction of lightweight materials with high specific properties such as composites materials. Wood based materials combined with fibre-reinforced polymer appear to be good candidates if we introduce environmental aspects, safety considerations, and energy absorption capabilities. Thus, several sandwich configurations with plywood cores has been characterized to impact tests in order to quantify the energy absorption capability of such materials. A comparison of these results is proposed with the sandwich materials currently used in the aeronautics industry to be able to identify the potentiality of these new wood-based structures. We analyzed their post impact strength through compression after impact test. Finally, several structures were identified as good compromise solutions between residual strength and stiffness to replace actual sandwich structures. Regarding to their impact behaviour, and based on numerical models developed, manufacturing and testing of a crash box using wood based sandwich structures should be carried out in the future.

**Mots Clés :** absorption d'énergie, sandwich, contreplaqué, impact, crash-box

**Keywords :** energy absorption, sandwich, plywood, impact, crash-box

## 1. Introduction

Les structures sandwichs sont des structures composites légères qui sont largement utilisées dans de nombreux secteurs tels que l'automobile, l'aéronautique, le spatial, le milieu maritime pour de nombreux avantages comme par exemple une rigidité et une résistance spécifique à la flexion élevées, un excellent amortissement, ou encore un bon isolant thermique et acoustique [1-2]. La réduction d'émission de carbone et le développement durable sont des objectifs communs dans l'industrie du transport. Un moyen d'atteindre ces objectifs est la mise en œuvre de structures légères basées sur de nouveaux matériaux. Les panneaux sandwichs avec âme en contreplaqué et peaux en composites semblent être de bons candidats. Le contreplaqué est largement utilisé dans la

construction navale, encore utilisé dans la construction d'avions artisanaux et, jusque dans les années 1990, a été utilisé dans la conception d'aéronefs industriels. La combinaison contreplaqué et composites semble être pertinente pour l'allégement des structures et a fait l'objet d'études statiques et à l'impact au laboratoire [3-4-5]. Les structures sandwichs ayant des propriétés spécifiques élevées, un faible coût, et une bonne capacité de dissipation d'énergie semblent être des candidats prometteurs pour des applications d'impact et de crash dans le secteur du transport.

Les tests d'impact se classent généralement en fonction de la vitesse d'impact en trois catégories : basse vitesse (<10 m/s), moyenne vitesse (10 – 50 m/s), et haute vitesse (50 – 1000 m/s). Cette présentation est axée sur des essais d'impacts à basse vitesse et présente les travaux de Susainathan [6] qui a montré que les structures sandwichs à base de contreplaqué ont des propriétés intéressantes à l'impact en termes d'énergie absorbée, énergie spécifique absorbée, indentation, et compression après impact. Des perspectives sur des essais de comportement au crash sont également évoquées.

## 2. Matériel et méthode

L'âme du sandwich étudiée est donc du contreplaqué de deux natures différentes notées « plywood A » et « plywood B ». L'empilement et l'épaisseur des plis du contreplaqué sont présentés ci-dessous (Fig. 1). Les deux types de contreplaqué ont un nombre de plis différent mais la même épaisseur totale dans le but de rendre la comparaison plus facile.

Type	Plies	Orientation	Thickness (mm)	Plies	Orientation	Thickness (mm)	
Plywood - A	Okoume	0°	1	Plywood - B	Okoume	0°	1
	Okoume	90°	1		Poplar	90°	3
	Poplar	0°	2		Okoume	0°	2
	Poplar	90°	2		Poplar	90°	3
	Poplar	0°	2		Okoume	0°	1
	Okoume	90°	1				
	Okoume	0°	1				

Fig. 1. Empilement des plis des deux types de contreplaqué [4]

Les peaux sont constituées de feuilles d'aluminium, de composites carbone/époxyde, verre/époxyde, et lin/époxyde qui correspondent aux peaux les plus représentatives des peaux utilisées dans la construction de structures sandwich. Huit configurations différentes de structures sandwich à base de bois ont ainsi été constituées (Tab. 1). Une référence a été utilisée pour comparer les performances des sandwichs élaborés. Cette référence correspond à un sandwich à âme nib d'abeilles avec des peaux composites à fibres de carbone et de verre utilisé par Airbus en tant que plancher dans les A350.

Ame	Peau	Procédé	Densité	Epaisseur (mm)	Spécification procédé
Plywood A	/	/	0,461	10	/
Plywood B	/	/	0,433	10	/
Plywood A	Aluminium	/	0,678	11	/
Plywood A	Verre	Moulage sous vide de pré-imprégnés	0,638	12	160°C pendant 3h
	Carbone		0,569		90°C pendant 30min puis 125°C pendant 1h
Plywood B	Lin	Thermo-compression de pré-imprégnés	0,488	12	120°C pendant 1h, pression de 4bar
	Carbone		0,614		90°C pendant 30min puis 125°C pendant 1h, pression de 4bar
	Verre		0,609		160°C pendant 3h, pression de 4bar
Nid d'abeilles	Carbone et verre	/	0,233	10	/

Tab. 1. Réalisation des sandwichs par Susainathan [3]

Concernant les essais d'impact, ils ont été réalisés à l'aide d'un poids tombant permettant d'atteindre une vitesse d'impact de 5 m/s et d'une énergie d'impact de 5, 10, et 15 J, suivi d'une analyse tomographique. Les échantillons mesurent 125 x 75 mm<sup>2</sup> lesquels sont encastrés par une plaque permettant de tenir les éprouvettes au cours de l'impact (Fig. 2 (a)).

Les essais de compression et de compression après impact ont été réalisés sur une machine de traction à une vitesse de 1,2 mm/min. La compression s'est faite à l'aide d'un montage (Fig. 2 (b)) qui empêche le flambage de la structure avant la propagation des endommagements causés par l'impact.

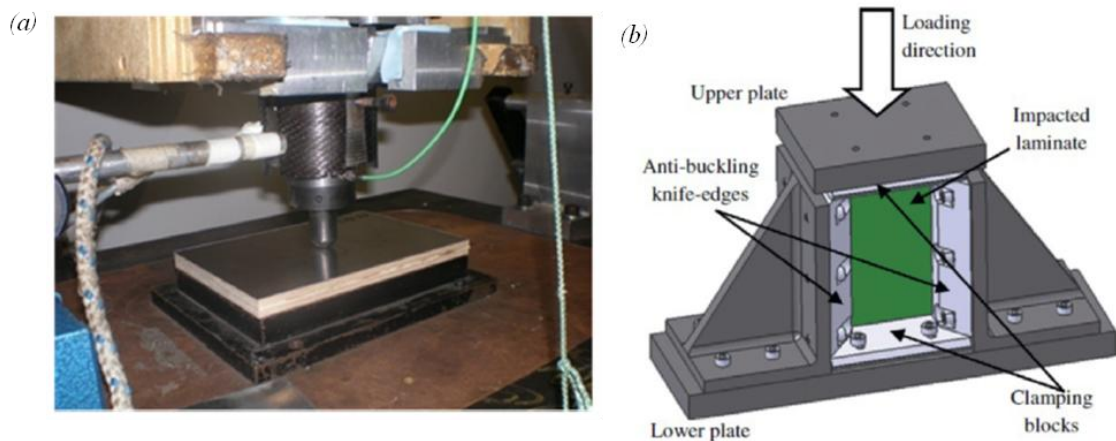


Fig. 2. (a) Système poids-tombant [4] (b) Montage de compression après impact [5]

### 3. Résultats expérimentaux et discussion

Les résultats d'impact sont présentés ci-dessous (Fig. 3 et 4). Plusieurs critères sont regardés au cours d'essais d'impact. Le premier résultat exploitable est celui des courbes forces-déplacement. Ces dernières nous permettent de calculer l'énergie absorbée au cours de l'impact par la structure. L'énergie absorbée rapportée au poids de la structure nous permet de déterminer l'énergie spécifique d'absorption (J/g ou kJ/kg). Un autre critère très souvent regardé est celui de l'indentation causée par l'impacteur. L'indentation correspond à l'enfoncement permanent généré par l'impacteur et peut se mesurer sur les différentes couches par une découpe de l'éprouvette ou bien par tomographie. Le ratio entre l'énergie absorbée et l'indentation générée a également été étudié. Enfin, il est fréquent qu'une compression après impact soit réalisée afin d'avoir un regard sur les propriétés mécaniques résiduelles de l'éprouvette.

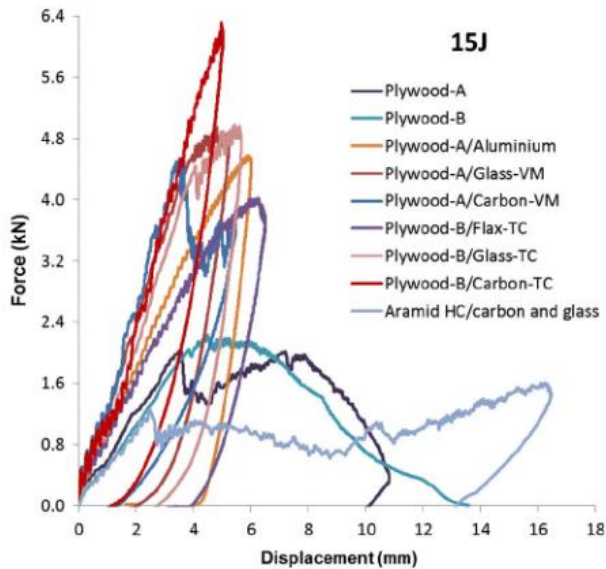


Fig. 3. Résultats des essais d'impact à 15 J [4]

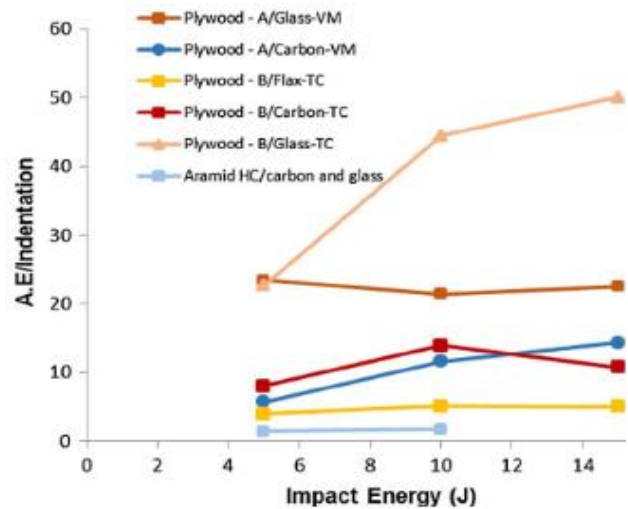


Fig. 4. Ratio énergie absorbée / indentation de 5 à 15 J [4]

Le contreplaqué A seul s'est avéré légèrement meilleur que le contreplaqué B en termes d'énergie absorbée ( $A = 81\%$  et  $B = 70\%$ , pour 10 J) dû au plateau correspondant à la compression des cellules du contreplaqué, et l'indentation ( $A = 1,87$  mm et  $B = 2,30$  mm, pour 10 J) due au nombre plus important d'interfaces conduisant à un meilleur comportement transverse. De plus, les deux contreplaqués ont des énergies spécifiques absorbées comparables ( $A = 32$  J/g et  $B = 35$  J/g, pour 15 J) mais inférieures au matériau de référence (59 J/g, pour 15 J) dû à leur plus forte densité et à une indentation plus faible que le matériau de référence (5,57 mm, pour 10 J). Cependant, à 15 J, les trois matériaux (référence + 2 contreplaqués) voient une perforation totale avec une grande perte de rigidité structurelle qui peut être incompatible dans beaucoup d'applications.

Concernant les sandwichs avec les peaux en aluminium, en les comparant avec les contreplaqués seuls, il y a une absence de plateau due à la rigidité des peaux mais l'énergie absorbée est comparable à celle des contreplaqués seuls (83%, pour 10 J). Ces structures présentent une indentation plus importante que tous les autres sandwichs avec peaux composites mais plus faible que le matériau de référence ( $Al = 2,65$  mm, pour 10 J). Par contre, il n'est pas performant en termes d'énergie spécifique d'absorption (18 J/g, pour 15 J) à cause de sa densité plus importante. Enfin, ces trois structures (2 contreplaqués et sandwich avec peaux en aluminium) voient une indentation plus grande que celle des sandwichs avec les peaux en composites.

En termes d'énergie absorbée et quelque soit le procédé utilisé (moulage sous vide = 55% et thermo-compression = 49%, pour 10 J), les fibres de carbone montrent une faiblesse due à leur grande rigidité générant une faible indentation (moulage sous vide = 0,49 mm et thermo-compression = 0,36 mm, pour 10 J), et voient le pic de charge le plus élevé de tous les sandwichs (6,4 kN). Cependant, les peaux composites à base de fibres de carbone présentent une grande délamination dans la peau et à l'interface peaux/âme, et une surface d'écrasement du contreplaqué importante à cause du retour élastique des peaux et de la faible adhésion entre les peaux et l'âme. Cette faible adhésion vient certainement d'une pression insuffisante appliquée au cours du moulage sous vide ou de la remontée d'air ou d'eau aux interfaces lors de la cuisson.

Les fibres de verre, quant à elles, présentent une meilleure adhésion entre la peau et l'âme résultant d'une énergie absorbée (moulage sous vide = 75% et thermo-compression = 68%, pour 10 J),

comparable à celle obtenue avec les peaux en lin et une indentation plus faible que celle des peaux en fibres de carbone (moulage sous vide = 0,38 mm et thermo-compression = 0,16 mm, pour 10 J). Quel que soit le niveau d'énergie d'impact, c'est le matériau qui semble présenter le meilleur compromis entre énergie absorbée et indentation.

Les fibres de lin sont comparables aux sandwichs obtenus avec les peaux en aluminium et en verre en termes d'énergie absorbée (thermo-compression = 72%, pour 10 J) mais montrent une indentation plus faible que les peaux en aluminium (thermo-compression = 1,45 mm, pour 10 J). Par ailleurs, la décohésion entre la peau et l'âme est presque inexistante (Fig. 4) dû à une bonne adhésion peaux/âme, d'une part, du fait d'une faible plasticité des fibres de lin.

Enfin, en prenant en compte uniquement l'énergie spécifique absorbée, nous pouvons observer que les sandwichs avec les peaux en fibres de lin sont d'excellents candidats en comparaison du matériau de référence et des autres sandwichs (25 J/g, pour 15 J) grâce à leur faible densité et le niveau de l'énergie spécifique absorbée. En prenant en compte le ratio énergie absorbée sur l'indentation, le meilleur candidat pour des sollicitations à l'impact semblent être le sandwich avec les peaux en fibres de verre.

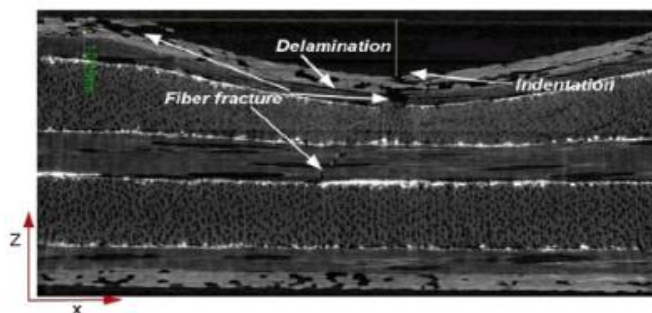


Fig.4. Tomographie du sandwich plywood B + peau en lin impactée à 15 J [4]

Les résultats de compression après impacts sont présentés dans la Fig. 6. La Fig. 6 (a) présente la perte de résistance structurelle correspondant à la variation de la charge maximale vue au cours de la compression entre le matériau sain et endommagé. La Fig. 6 (b) montre les propriétés spécifiques des 9 configurations de sandwichs normalisées sur le matériau de référence.



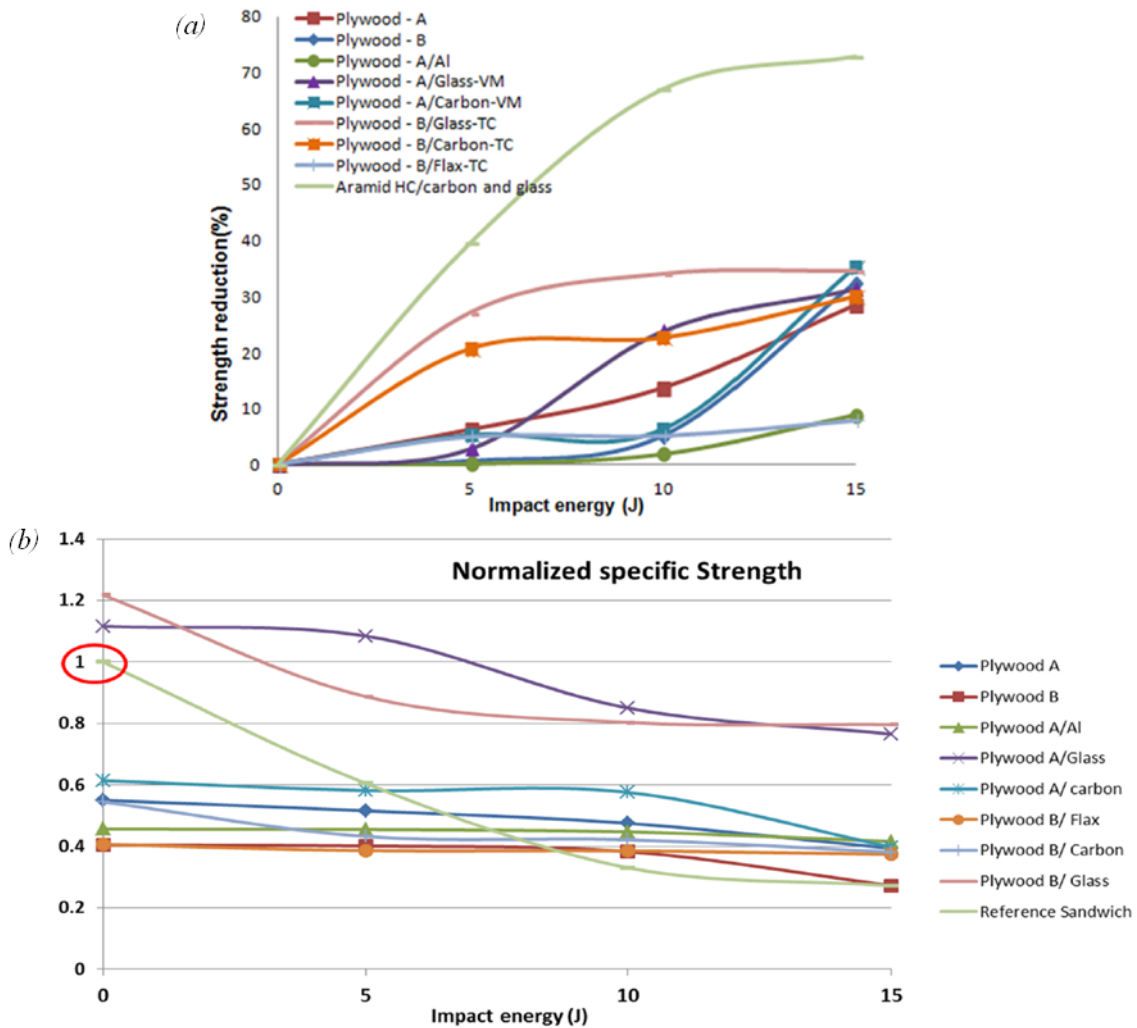


Fig.6. (a) Réduction de la résistance structurelle (b) Résistances structurelles spécifiques normalisées [5]

Quelle que soit la méthode de mise en œuvre (thermo-compression ou moulage sous vide), et que ce soit vierge ou impacté, la structure sandwich présentant la meilleure résistance à la compression est celle avec les peaux en fibres de verre qui est également le matériau le moins cher. Viennent ensuite les peaux en fibres de carbone du fait d'une mise en œuvre à optimiser (adhésion peau-âme mauvaise) et d'une ruine induite (flambage de la peau) défavorable. Par ailleurs, nous pouvons constater que le matériau de référence (excepté non-impacté) se trouve avoir la plus basse résistance en compression : même les structures en contreplaqué seul sont plus performantes. Les structures sandwichs avec les peaux en aluminium ou en fibres de lin montrent un comportement mécanique similaire et particulièrement intéressant : une réduction de moins de 10% et par exemple à 15 J sont comparables aux structures sandwichs avec les peaux avec fibres de carbone. Les ruines de ces sandwichs en compression se caractérisent par des ruptures de peau souvent après un flambage local.

#### 4. Conclusion et perspectives

Les essais d'impact de sandwichs ont été menés à basse vitesse amenant des niveaux d'énergie de 5, 10, et 15 J. Deux types de contreplaqué, un matériau de référence utilisé par Airbus, mais aussi des sandwichs avec une âme en contreplaqué et des peaux en aluminium, composites carbone/époxyde, verre/époxyde, et lin/époxyde ont été impactés puis ont subi de la compression post-impact.

Les résultats montrent qu'en termes d'énergie spécifique d'absorption, le sandwich ayant l'âme en contreplaqué et les peaux en fibres de lin propose l'énergie spécifique d'absorption la plus élevée : 25 J/g liée à sa faible masse volumique. En prenant en considération l'énergie absorbée et l'indentation générée par l'impacteur, la combinaison contreplaqué et fibres de verre ressort comme étant le meilleur candidat pour ce type de sollicitation. Les essais de compression après impact ont montré que les sandwiches avec des peaux en composites à fibres de verre proposaient les meilleures propriétés mécaniques résiduelles par rapport aux matériaux étudiés.

Les performances à l'impact de la combinaison contreplaqué et peaux en composites ont montré des résultats très intéressants tant en termes d'énergie absorbée, d'énergie spécifique d'absorption, d'indentation, et de compression après impact. Aujourd'hui, nous étudions l'intérêt de cette même combinaison pour la réalisation de crash-box, c'est-à-dire pour une absorption d'énergie progressive et contrôlée sans conservation de l'intégrité structurelle.

## Références

- [1] Zenkerts D, "The handbook of sandwich construction", United Kingdom : Engineering Materials Advisory Services Ltd, 1997
- [2] Bucci V, Corigliano P, Crupi V, Epasto G, Guglielmino E, "Experimental investigation on Iroko wood used in shipbuilding", *Pro Mech Eng C-J Mec* 2017, 231 : 128-39
- [3] Susainathan J, Eyma F, De Luycker E, Cantarel A, Castanié B, "Manufacturing and quasi-static bending behaviour of wood-based sandwich structures", *Composites Structures* 2017, 182 :487-504
- [4] Susainathan J, Eyma F, De Luycker E, Cantarel A, Castanié B, "Experimental investigation of impact behaviour of wood-based sandwich structures", *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* 2018, 109 :10-19
- [5] Susainathan J, Eyma F, De Luycker E, Cantarel A, Bouvet C, Castanié B, "Experimental investigation of compression and compression after impact of wood-based sandwich structures", *Composites Structures* 2019, 220, 236-249
- [6] Susainathan J, "Development and characterization of wood-based eco-structures", Ph.D. thesis, University of Toulouse, 2017