



**HAL**  
open science

## Analyse du comportement dynamique de composites et de structures sandwiches bio-sourcés

Arthur Monti, Zouhaier Jendli, Abderrahim El Mahi, Laurent Guillaumat

► **To cite this version:**

Arthur Monti, Zouhaier Jendli, Abderrahim El Mahi, Laurent Guillaumat. Analyse du comportement dynamique de composites et de structures sandwiches bio-sourcés. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01621552

**HAL Id: hal-01621552**

**<https://hal.science/hal-01621552>**

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.

## **Analyse du comportement dynamique de composites et de structures sandwiches bio-sourcés**

### *Analysis of the dynamic behavior of bio-based composites and sandwiches*

**A. Monti<sup>1,2,3</sup>, Z. Jendli<sup>2</sup>, A. El Mahi<sup>1</sup>, L. Guillaumat<sup>3</sup>**

1 : LAUM UMR CNRS 6613, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine,  
Université du Maine  
Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans  
e-mail : [arthur.monti@univ-lemans.fr](mailto:arthur.monti@univ-lemans.fr), [abderrahim.elmahi@univ-lemans.fr](mailto:abderrahim.elmahi@univ-lemans.fr)

2 : ESTACA'LAB, Laboratoire de Structures et Matériaux,  
ESTACA,  
Campus Ouest, Rue Georges Charpak, BP 76121, 53061 Laval cedex 9  
e-mail : [zouhaier.jendli@estaca.fr](mailto:zouhaier.jendli@estaca.fr)

3 : LAMPA – Laboratoire Arts et Métiers Paris Tech Angers  
Arts et Métiers Paris Tech CER Angers 2  
Boulevard du Ronceray, 49035 ANGERS CEDEX 01  
e-mail : [laurent.guillaumat@ensam.eu](mailto:laurent.guillaumat@ensam.eu)

### **Résumé**

Dans la perspective d'évaluer l'intérêt de nouvelles solutions matériaux utilisées pour le dimensionnement de structures tolérantes aux dommages, la présente étude développe une caractérisation dynamique du comportement mécanique de matériaux et de structures sandwiches éco-composites. Les peaux sont constituées de plusieurs plis de résine polymère thermoplastique renforcée de fibres de lin. L'âme du sandwich est un assemblage de bois balsa. La résine Elium<sup>TM</sup> infusée en une seule étape est un polymère thermoplastique activé par un peroxyde. Les expérimentations proposées décrivent la réponse de la structure globale vis-à-vis d'un chargement dynamique rapide en configuration d'impact/indentation à faible masse et faibles vitesses. Pour approfondir les résultats obtenus, l'influence des caractéristiques des constituants, notamment de l'épaisseur et de la masse volumique de l'âme, ainsi que de la séquence d'empilement des peaux a été étudiée. Les mécanismes d'endommagement et de rupture observés sont étudiés afin d'établir une chronologie de l'endommagement permettant de caractériser la résistance à l'impact de la structure. Les résultats montrent une bonne capacité du sandwich Lin/Elium/Balsa à dissiper l'énergie de l'impact. Toutefois, la dissipation d'énergie génère des mécanismes d'endommagement sévères, en particulier sur la face opposée à celle impactée.

### **Abstract**

In order to evaluate the benefit of new materials used for dimensioning damage-tolerant structures, the present paper develops a dynamic characterization of the mechanical behavior of eco-composites sandwich structures and laminates. The thin skins are made up with several plies of thermoplastic polymer resin reinforced with flax fibers. The core of the sandwich is an assembly of balsa wood. The resin used is a thermoplastic polymer activated by a peroxide. The proposed experiments investigate the response of the overall structure to dynamic loading in low-energy impact / indentation configuration. In order to deepen the results obtained, the influence of the characteristics of the components, in particular the thickness and the density of the core, as well as the stacking sequence of the skins was studied. The damage mechanisms and failure modes observed are studied in order to establish a failure chronology making it possible to characterize the resistance to the impact of the structure. The results show a good capacity of the Flax / Elium / Balsa sandwich to dissipate impact energy. However, energy dissipation generates severe damage mechanisms, especially on the opposite face.

**Mots Clés :** Eco-composite, structure, dynamique, comportement à l'impact, fibres de lin, thermoplastiques.

**Keywords :** Eco-composite, structure, dynamic, impact behaviour, flax fibers, thermoplastics.

## 1. Introduction

Actuellement, les matériaux composites à constituants renouvelables sont un sujet de choix en termes de recherche d'innovation et de solutions alternatives aux composites classiques à fibres synthétiques [1-2]. Les fibres végétales, renforçant une matrice polymère thermoplastique ou thermodurcissable, représentent une solution crédible et bien adaptée aux récentes directives réglementaires. En effet, leurs propriétés spécifiques (caractéristiques mécaniques rapportées à la masse) extrêmement intéressantes en font de bons candidats pour répondre aux challenges actuels d'allègement des structures [3-4]. Les éco-composites sont donc particulièrement intéressants pour les industriels du transport (automobile, aéronautique, naval, etc.). Pourtant, les utilisations concrètes de ce genre de matériaux se limitent encore à des applications non structurelles. En effet, de nombreux verrous scientifiques et techniques nécessitent encore d'être levés. Il s'agit, à titre d'exemple, de leur durée de vie dans des conditions environnementales particulières (température, humidité, milieu salin) et/ou sous des sollicitations complexes (cycliques, couplées) ou encore les mécanismes de rupture et certains phénomènes de comportements non linéaires [5-6].

Selon l'application visée, une structure peut être amenée à subir différents types d'impacts. Parmi les plus fréquemment évoqués, on peut citer : les projections de graviers ou de cailloux, les chutes d'outils au cours de la mise en œuvre des structures ou des opérations de maintenance, la grêle ou bien d'autres origines. Tous ces types d'impacts ont des caractéristiques différentes et donc de multiples répercussions possibles sur les propriétés mécaniques de la structure. Ainsi, la caractérisation du comportement au choc d'un matériau dépend fortement de son utilisation et donc du type d'impact auquel il est susceptible d'être soumis. En considérant les critères du cahier des charges, il est souvent nécessaire d'évaluer, d'une part, la résistance à l'impact qui explicite le niveau d'énergie nécessaire à l'apparition des premiers mécanismes d'endommagement [7-8]. Les propriétés résiduelles du matériau après l'impact, permettent ainsi de justifier si la structure nécessite une réparation immédiate ou si elle est encore apte à assurer sa fonction de service malgré les dommages causés. Cet aspect est particulièrement important en ce qui concerne les chocs à faible énergie. A savoir, ces derniers ne laissent pas forcément de traces visibles mais peuvent provoquer des dommages internes importants. D'autre part, la capacité d'absorption d'énergie par le matériau ou la structure est aussi un paramètre primordial à déterminer au cas où celle-ci devait assurer une fonctionnalité de protection contre les chocs.

Dans ce contexte, cette étude propose d'analyser en première approche la résistance aux chocs à faibles vitesses et faible masse des structures sandwiches Lin/Elium/Balsa.

## 2. Approche de caractérisation expérimentale

L'objectif principal est d'étudier la résistance de la structure à ce type de chargement ainsi que les principaux mécanismes d'endommagement. Plusieurs niveaux d'énergie sont imposés à la structure. De plus, l'influence des propriétés des constituants, telles que l'épaisseur et la masse volumique de l'âme, ou encore la séquence d'empilement des peaux est étudiée.

### 2.1 Matériaux et structure sandwich

Les peaux sont constituées d'une résine thermoplastique renforcée par des fibres de lin. L'âme est en balsa, un bois présentant de très bonnes caractéristiques spécifiques en cisaillement et en compression. Tout d'abord, les différents plis de fibres sont découpés manuellement. Ces tissus secs sont ensuite séchés en étuve ventilée pendant une heure environ à une température de 110°C [3]. Ce cycle permet d'obtenir un séchage satisfaisant sans trop dégrader les propriétés mécaniques des fibres. Les fibres sèches sont ensuite disposées selon la séquence d'empilement souhaitée de part et d'autre de l'âme en balsa. L'ensemble est alors placé sur un moule plat et complété par un milieu drainant, un film micro-perforé, un tissu d'arrachage et couvert d'une bâche à vide. La figure (Fig. 1) illustre le procédé d'infusion de résine liquide pour la mise en œuvre des composites stratifiés et les structures

sandwiches. Plus de détails, sur la mise en place et le déroulement de la mise en œuvre, sont donnés dans les travaux de A. Monti [3].

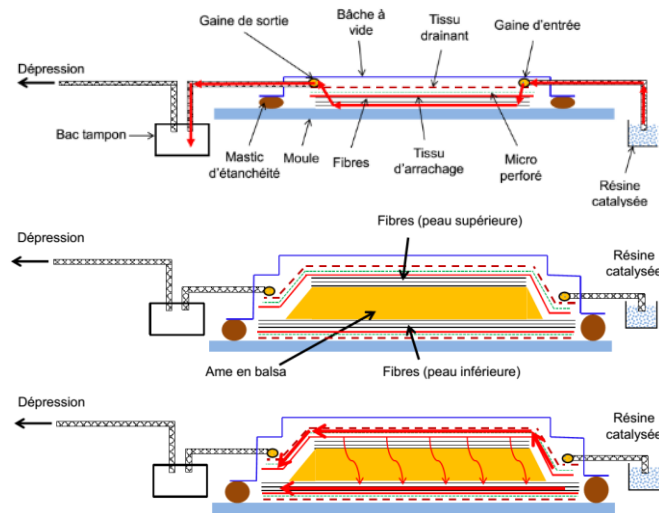


Fig. 1. Vue en coupe du procédé d'infusion de résine liquide pour la mise en œuvre (a) des composites stratifiés et (b) les structures sandwiches [3].

Etant donnée la très grande fluidité de la résine Elium, la structure sandwich est mise en œuvre par infusion en une seule étape, un procédé de fabrication habituellement utilisé avec des résines thermodurcissables. L'infusion de résine liquide consiste à disposer les plis de renfort secs selon la séquence d'empilement ou la disposition souhaitée et de placer cet ensemble sous vide. La dépression est alors utilisée pour faire avancer la résine à travers la préforme, réalisant ainsi le mouillage des tissus. Par la suite, la dépression permet le compactage du composite jusqu'à polymérisation pour atteindre un taux de fibre plus élevé que dans le cas d'une polymérisation sans pression. Deux séquences d'empilement pour les peaux et quatre épaisseurs différentes de l'âme ont été élaborées pour faire varier les caractéristiques des poutres sandwiches et les modes de sollicitation.

## 2.2 Protocole et essais expérimentaux

Différents essais de caractérisation ont été réalisés à l'échelle des constituants et sur la structure complète au cours de travaux préliminaires [3]. En complément, cette étude propose une analyse du comportement du sandwich Lin/Elium/Balsa face à une sollicitation dynamique du type choc/impact.

En première approche, les conditions expérimentales ont été choisies de manière à privilégier l'indentation locale du matériau avec des conditions aux limites restreintes, en imposant des chocs à faible vitesse et faible masse correspondant à une gamme d'énergies allant de 2 à 20 joules. Il existe de nombreux paramètres pouvant influencer la nature de l'impact et donc ses effets sur le matériau étudié. Les principaux d'entre eux sont la vitesse, l'énergie, la géométrie de l'impacteur, les conditions aux limites, les caractéristiques de l'éprouvette impactée. Les essais d'impact ont été réalisés au moyen d'une tour de chute IMATEK-IM-10HV. La machine est équipée d'un capteur de force de 30 kN. Le déplacement de l'indenteur est mesuré au moyen d'un capteur laser. Les essais ont été réalisés en s'inspirant des normes ASTM D5628-1 et ASTM D7766-2 dans les conditions de température et d'humidité ambiante. Afin de limiter la quantité de matériau nécessaire et dans le but de privilégier, dans un premier temps, l'indentation du sandwich devant sa réponse structurelle en flexion, des conditions aux limites restreintes ont été utilisées. Ainsi, les échantillons ont été encastrés avec une surface libre circulaire de 40 mm de diamètre. Un impacteur hémisphérique de diamètre 20 mm, a été utilisé associé à une masse totale de 9 kg. Plusieurs configurations d'éprouvettes sandwiches de section 60mm x 60mm ont été testées. Ces différentes configurations seront notées S- $\rho_a$ - $e_a$ , S désignant la séquence d'empilement des peaux ( $[0/90]_s$  ou  $[0_4]$ ), constituées de 4 plis pour une épaisseur de 1.6 mm,  $\rho_a$  la masse volumique de l'âme (100 ou 150 kg.m<sup>-3</sup>) et  $e_a$  l'épaisseur de

l'âme (6.4, 12.7, 15.9 ou 19.1 mm). Ainsi, différentes séries d'essais ont été menées pour mettre en évidence l'influence de l'énergie d'impact, de la séquence d'empilement des peaux, de la masse volumique et de l'épaisseur de l'âme sur la réponse du matériau. Pour chaque configuration, les essais ont été répétés au moins 5 fois afin de prendre en compte la dispersion des résultats.

### 3. Analyse des résultats obtenus

#### 3.1 Influence de l'énergie d'impact

L'influence de l'énergie d'impact sur les sandwichs du type  $[0/90]_s - 150 - 15.9$  a été étudiée. La hauteur de chute a été adaptée pour faire varier la vitesse et imposer des énergies d'impact allant jusqu'à 20 Joules. Les principaux couples masse/vitesse utilisés ainsi que les énergies correspondantes sont synthétisés dans le tableau 1.

Energie [J]	2	3	5	7	8	10	15	20
Masse [kg]	9	9	9	9	9	9	9	9
Vitesse [ $m.s^{-1}$ ]	0,67	0.82	1.05	1.25	1.33	1.49	1.83	2.11

Table 1. – Principaux couples (masse, vitesse) et énergie correspondante.

Des courbes représentatives des essais réalisés avec différents niveaux d'énergie sont présentées en figure 2. Elles montrent l'évolution du déplacement de l'indenteur en fonction du temps (fig. 2.a), de la charge appliquée en fonction du temps (fig. 2.b) et de la charge en fonction du déplacement (fig. 2.c). L'analyse de l'évolution du déplacement en fonction du temps montre deux phases distinctes, l'une croissante et l'autre décroissante. La première correspond à la pénétration de l'impacteur dans le matériau ainsi qu'à une déformation de la structure en flexion. La seconde phase correspond à un retour élastique de l'ensemble. Toutefois, on constate que le déplacement ne revient pas à zéro, du fait des déformations permanentes mentionnées précédemment. Ces deux phases se retrouvent sur la courbe représentant l'évolution de la charge en fonction du temps. La dissymétrie observée témoigne bien d'un endommagement de l'éprouvette. Il est à noter qu'après une augmentation linéaire de la force, correspondant à la déformation élastique de la structure, une succession de décrochements de la charge est visible. Ces irrégularités sont plus prononcées pour les niveaux d'énergie les plus élevés. Les plus significatives d'entre elles peuvent être attribuées à des mécanismes d'endommagement importants. On peut alors constater une diminution de la pente de la courbe force/déplacement après ces pics, traduisant une baisse de la raideur de la structure. Certains auteurs établissent des corrélations directes entre des phénomènes d'endommagement ou de rupture et les principaux décrochements de la charge [9]. Toutefois, certaines irrégularités de la courbe peuvent aussi être attribuées à des vibrations du matériau ou du banc d'essai. En effet, l'impact imposé pouvant être assimilé à une impulsion de Dirac, génère un bruit blanc pouvant ainsi exciter les différents constituants de l'éprouvette ou du banc à des fréquences proches de leurs fréquences de résonance.

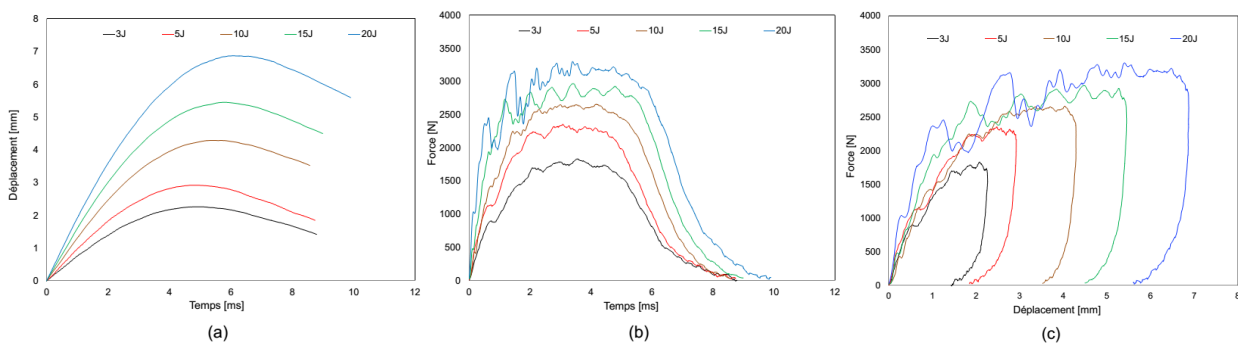


Fig. 2 – Courbes caractéristiques de l'influence de l'énergie d'impact :  
a) force/temps, b) déplacement/temps et c) force/déplacement

Une analyse énergétique permet de constater que la majeure partie de l'énergie apportée est absorbée par le matériau (entre 85 à 98 %). De ce fait, l'énergie élastique est toujours inférieure à 15% même pour les faibles niveaux d'énergie imposés, témoignant ainsi d'une faible déformation de la structure en flexion du fait des conditions aux limites restreintes. Par ailleurs, on peut remarquer une variabilité importante des résultats. Celle-ci peut être expliquée par le caractère très localisé de l'endommagement. De ce fait, la réponse mesurée dépend fortement des caractéristiques mécaniques du bloc de balsa qui se trouve sous l'impacteur.

Différentes analyses macroscopiques des échantillons endommagés ont été réalisées afin d'identifier les principaux mécanismes d'endommagement engendrés par les impacts. A titre d'exemple, la figure 3 présente la photographie d'une coupe d'un échantillon caractéristique  $[0/90]_s - 150 - 15.9$  impacté à 15 J. Les mécanismes d'endommagement et de rupture sont identifiés et reportés sur la figure 3. Les résultats obtenus sur différents échantillons et à des niveaux d'énergie multiples ont permis de proposer une chronologie d'apparition de ces mécanismes.

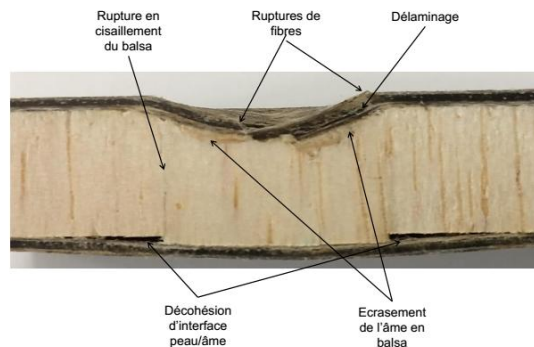


Fig. 3. Coupe d'un échantillon  $[0/90]_s - 150 - 15.9$  impacté à 15 Joules.

Des analyses par ultrasons Cscan de la face opposée ont été réalisées. La figure 4 montre deux cartographies obtenues pour un échantillon impacté à 15 Joules. Elles représentent respectivement les temps de vols et les amplitudes temporelles des ondes enregistrées sur une zone de 60 x 60 mm<sup>2</sup> autour du point d'impact. L'analyse du temps de vol confirme la présence d'un déplacement provoquant un bombement qui s'étend sur une surface circulaire d'environ 40 mm de diamètre. De plus, l'analyse de l'amplitude temporelle confirme l'existence au centre de la zone endommagée d'une surface de contact parfait entre le balsa et la peau composite d'un diamètre de 20 mm environ. Du fait de la pénétration de l'impacteur, on peut donc confirmer qu'un bloc de balsa d'un diamètre proche de celui de l'impacteur est rompu en cisaillement et décalé vers le bas. La variation de l'amplitude temporelle en périphérie de cette zone confirme la décohésion entre la peau et l'âme.

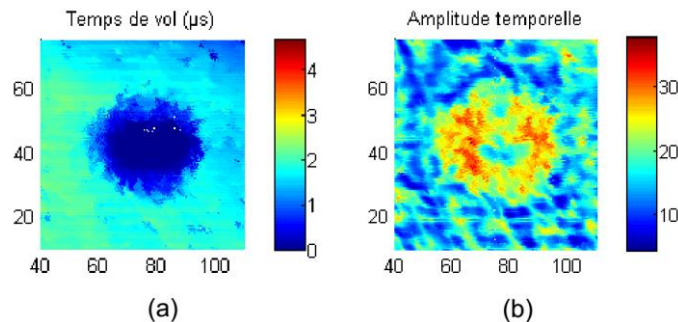


Fig. 4. Analyse par ultrason (Cscan) de la face opposée à l'impact : a) temps de vol et b) amplitude temporelle

Les résultats d'essais mettent en évidence une bonne capacité de la structure à dissiper l'énergie de l'impact. Toutefois, cette dissipation d'énergie s'effectue par le biais de mécanismes d'endommagement sévères, notamment au niveau de la face opposée [3].

### 3.2 Influence des propriétés de l'âme du sandwich

L'étude de l'influence de l'épaisseur de l'âme, sur la réponse des structures sandwichées à l'impact, est explicitée à travers quatre configurations d'éprouvettes testées. Les épaisseurs  $e_a$  de l'âme considérées sont égales à 6.4, 12.7, 15.9 et 19.1 mm, notées respectivement  $[0/90]_s - 150 - 6.4$ ,  $[0/90]_s - 150 - 12.7$ ,  $[0/90]_s - 150 - 15.9$ , et  $[0/90]_s - 150 - 19.1$ . Quatre courbes force/déplacement représentatives de ces différentes configurations sont données sur la figure 5.a. A partir de ces résultats, les évolutions des grandeurs caractéristiques, tels que la charge maximale, les déplacements maximal et résiduel, les énergies absorbée et restituée ont pu être calculées. La figure 5.b présente les énergies absorbée et restituée en fonction de l'épaisseur de l'âme. On peut remarquer une augmentation de la force maximale appliquée avec l'épaisseur de l'âme. Elle varie de 2500 N pour une épaisseur de 6.4 mm à 4500 N environ pour une épaisseur de 19.1 mm. Ce résultat est cohérent du fait de l'augmentation de la rigidité en flexion des sandwichs induite par l'augmentation de l'épaisseur. Pour cette raison, les déplacements maximal et résiduel diminuent quasi linéairement avec l'épaisseur. Pour les échantillons les moins épais, la déformation en flexion est plus importante, maximisant ainsi l'énergie restituée  $E_r$  du fait du retour élastique de la structure. Au contraire, lorsque l'épaisseur de l'âme augmente, l'indentation locale plus prononcée explique la hausse de la quantité d'énergie absorbée  $E_a$ .

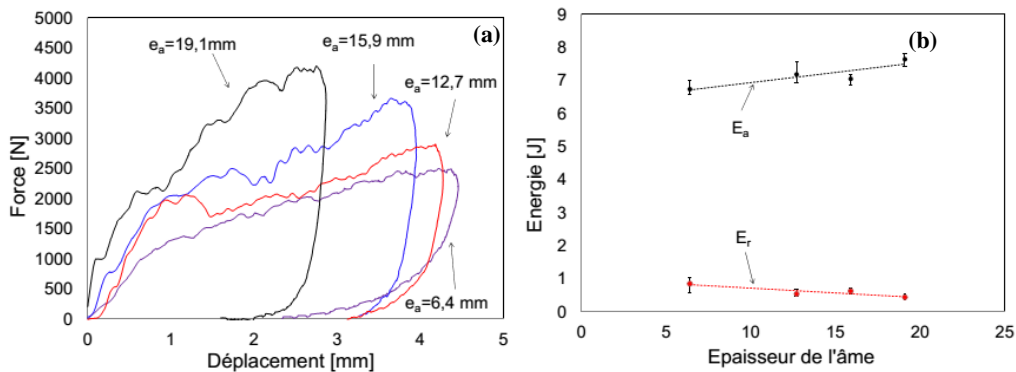


Fig. 5. Evolution des grandeurs caractéristiques en fonction de l'épaisseur de l'âme : a) courbes typiques forces/déplacements, b) énergie absorbée et restituée.

Par ailleurs, l'influence de la masse volumique de l'âme a été étudiée pour deux configurations d'échantillons notées  $[0/90]_s - 150 - 12.7$  et  $[0/90]_s - 100 - 12.7$ , avec des masses volumiques d'âme respectivement égales à  $\rho_a = 150 \text{ kg.m}^{-3}$  et  $\rho_a = 100 \text{ kg.m}^{-3}$ . Ces configurations ont été testées avec une énergie imposée de 8 Joules. Les courbes force/déplacement obtenues sont présentées en figure 6.a. De plus, les grandeurs caractéristiques ont été déterminées à partir de ces résultats et sont présentées en figure 6.b. Celle-ci présente les différentes grandeurs pour les deux configurations étudiées, rapportées à celles des éprouvettes avec une masse volumique  $\rho_a = 100 \text{ kg.m}^{-3}$ . Il ressort que l'augmentation de la masse volumique entraîne une hausse de la raideur en flexion des éprouvettes, caractérisée par la pente de la courbe force/déplacement. De ce fait, la force maximale augmente ainsi que la force correspondant au premier décrochement significatif de la courbe force/déplacement. En effet, A. Monti [3] constate que les propriétés en cisaillement du balsa augmentent avec la masse volumique, de même que la rigidité et la résistance en compression. Ces deux phénomènes expliquent la diminution des valeurs de la force maximale, du déplacement maximal ainsi que du déplacement résiduel (correspondant au déplacement permanent une fois l'impacteur retiré) atteints pour les éprouvettes constituées d'une âme plus dense. Ces paramètres traduisent une diminution de la déformation en flexion mais aussi une pénétration moins importante de l'impacteur. Néanmoins, la quantité d'énergie absorbée dans les deux configurations reste comparable.

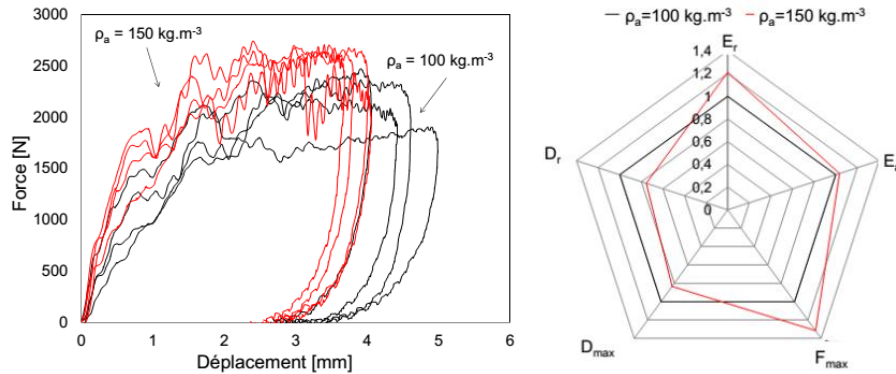


Fig. 6. Courbes force/déplacement (a) et Comparaison des propriétés relatives (b) pour les configurations  $[0/90]_s - 150 - 12.7$  et  $[0/90]_s - 100 - 12.7$ .

### 3.3 Influence de la séquence d'empilement des peaux

Pour étudier l'influence de la séquence d'empilement, deux types de sandwichs avec des peaux unidirectionnelles  $[0]_4$  et de type  $[0/90]_s$  ont été considérés. Ces deux séries d'éprouvettes, constituées d'une âme de masse volumique  $\rho_a = 150 \text{ kg.m}^{-3}$  de 15.9 mm d'épaisseur, notées respectivement  $[0]_4 - 150 - 15.9$  et  $[0/90]_s - 150 - 15.9$ , ont été impactées avec une énergie de 8 Joules. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 7.a, qui rassemble les courbes force/déplacement des différents essais réalisés. De plus, la figure 7.b présente une comparaison des propriétés des deux types de sandwichs rapportées à celles de la configuration  $[0/90]_s - 150 - 15.9$ .

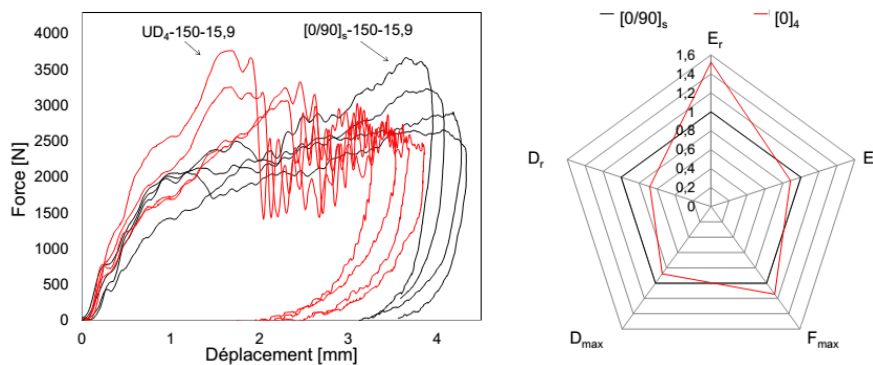


Fig. 7. Courbes force/déplacement (a) et Comparaison des propriétés relatives (b) pour les sandwichs  $[0]_4 - 150 - 15.9$  et  $[0/90]_s - 150 - 15.9$

On remarque que la pente de la phase quasi-linéaire initiale augmente légèrement pour les éprouvettes à peaux unidirectionnelles du fait d'une rigidité en flexion plus importante pour ce type de sandwich. De même, la force maximale appliquée augmente d'environ 20% par rapport à celle mesurée dans le cas des sandwichs à peaux croisées  $[0/90]_s$ . En effet, la raideur des peaux est plus importante pour les sandwichs de type  $[0]_4 - 150 - 15.9$ . Ensuite, après un décrochement significatif de la charge, les courbes force/déplacement correspondant aux éprouvettes de cette configuration présentent un palier d'effort centré autour de 2500 N dont l'allure est très irrégulière. Ce phénomène peut être causé par des vibrations du fait de l'utilisation d'une structure plus rigide et donc plus résonnante. Il est à noter une énergie restituée de l'ordre de 1.5 fois supérieure pour la configuration à peaux unidirectionnelles, qui peut être expliquée par l'augmentation de la résistance de l'éprouvette sandwich. De ce fait, l'énergie absorbée, ainsi que les déplacement maximal et résiduel sont plus faibles dans cette configuration. Enfin, des différences sont bien observables au niveau de la face impactée de l'échantillon pour les deux configurations [3]. L'endommagement de la peau supérieure est plus marqué dans le cas de la configuration  $[0]_4 - 150 - 15.9$ , pour laquelle des fissures longitudinales importantes sont constatées même en périphérie de la zone impactée.



#### 4. Synthèse et discussion

La synthèse des résultats précédents permet de proposer une chronologie de l'endommagement survenant lorsque les échantillons sont impactés avec ces conditions expérimentales. La figure 8, qui présente une courbe force/déplacement type, synthétise les principaux évènements. Tout d'abord, la charge appliquée évolue quasi linéairement avec le déplacement. Cette première phase correspond aux différentes déformations élastiques de l'éprouvette en flexion et des différents constituants sous l'impacteur immédiatement après la prise de contact. Des endommagements mineurs peuvent apparaître au cours de cette phase, comme des fissures dans la peau supérieure ou un léger écrasement de l'âme en balsa. Par la suite, un premier décrochement significatif de la charge peut être observé pour un déplacement imposé compris entre 1 et 2 mm. Il peut être attribué à la perforation de la peau supérieure. En effet, ses caractéristiques sont clairement influencées par l'énergie d'impact et par la séquence d'empilement du composite. La perforation de la peau supérieure implique alors des mécanismes d'endommagement tels que la rupture des fibres ou des délaminages dans le composite. Le déplacement de l'impacteur provoque ensuite l'effondrement de l'âme en balsa, obtenu soit par le flambement des parois cellulaires, soit par la formation de bandes de compression en périphérie de la zone indentée. Pour les échantillons impactés au-delà d'une énergie critique d'environ 8 Joules, un second décrochement significatif peut être observé pour un déplacement imposé compris entre 2 et 3 mm. Celui-ci peut alors être attribué à la rupture en cisaillement d'un bloc de balsa sous l'impacteur. La translation de celui-ci amorce une décohésion de l'interface peau/âme au niveau de la face opposée. La force appliquée cesse alors d'augmenter à mesure que l'impacteur pénètre dans le matériau, propageant cette décohésion ainsi que les mécanismes d'endommagement sous-jacents. Pour des énergies d'impact suffisantes, les déformations au niveau de la face opposée entraînent ensuite l'apparition de mécanismes d'endommagement au niveau de la peau inférieure, tels que des fissures, des délaminages ou des ruptures de fibres.

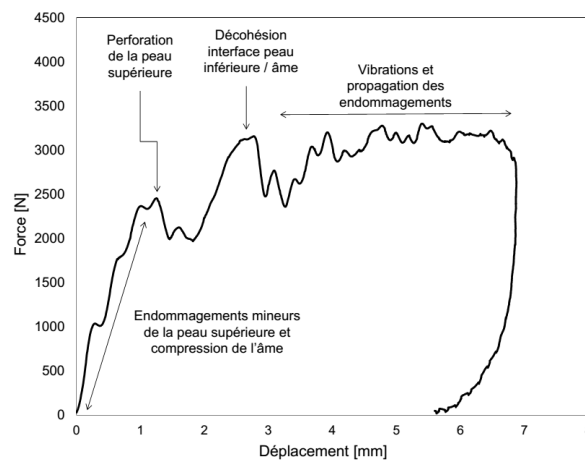


Fig. 8. – Chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement lors d'un essai d'impact

Ainsi, cette étude constitue une première analyse intéressante du comportement de cet éco-sandwich soumis à des sollicitations de type impact à faible vitesse et faible masse. Elle a permis de mettre en évidence les principaux effets des différents constituants sur la réponse de la structure dans ces conditions d'essais. D'autre part, les mécanismes d'endommagement les plus significatifs ont été identifiés et une chronologie d'apparition a été proposée. Toutefois, les résultats obtenus restent très dépendants des conditions expérimentales utilisées. De ce fait, afin de proposer une comparaison objective des propriétés de ce matériau avec des structures sandwichs non bio-sourcées existantes, des essais supplémentaires apparaissent nécessaires. D'autres conditions aux limites doivent être envisagées pour se placer dans des conditions de sollicitation moins sévères, permettant d'étudier la réponse en flexion de la structure. De plus, les caractéristiques de l'impact, notamment le couple (masse, vitesse) et la taille de l'impacteur peuvent être variées afin d'étudier une plus vaste gamme

de sollicitation. Enfin, les propriétés résiduelles des sandwichs doivent être estimées, en étudiant par exemple le comportement en statique et en fatigue d'échantillons impactés.

## 5. Conclusion

L'étude expérimentale est réalisée sur des structures sandwiches Lin/Elium/Balsa soumises à un chargement dynamique du type impact à faibles vitesses et faible masse. Une configuration d'essai particulière a été choisie, privilégiant l'indentation locale de la structure. L'influence de l'énergie de l'impact, de la séquence d'empilement des peaux ainsi que de l'épaisseur et la masse volumique de l'âme a été discutée. D'autre part, les mécanismes d'endommagement et de rupture ont été analysés. Les différents résultats obtenus ont permis de proposer une chronologie d'apparition de ces mécanismes. Cette étude a mis en évidence une bonne capacité de la structure à dissiper l'énergie de l'impact. Toutefois, cette dissipation d'énergie s'effectue par le biais de mécanismes d'endommagement sévères, notamment au niveau de la face opposée. Néanmoins, des études complémentaires apparaissent nécessaires pour avoir une vision plus globale, ainsi qu'une meilleure compréhension de la réponse de la structure à une plus vaste gamme de chocs, privilégiant par exemple la flexion de la structure devant l'indentation localisée, ou encore faisant intervenir d'autres couples masse/vitesse. Ses propriétés pourront alors être comparées objectivement à celles d'autres structures sandwiches, dans le but d'élargir le spectre des applications industrielles possibles pour cette structure éco-sandwich. Enfin, l'étude des propriétés résiduelles de cette structure impactée s'avère important pour affiner la vision des utilisations possibles de ce matériau.

## Remerciements

L'étude est réalisée dans la cadre du projet collaboratif régional MATIERES (MATériaux et Interfaces pour l'Environnement et l'exploitation des RESources naturelles). Nous adressons nos remerciements à la région Pays de la Loire pour leur soutien financier et associons nos partenaires industriels, ARKEMA et CTTM à ces travaux pour leur collaboration technique et la fourniture des matériaux.

## Références

- [1] J. Raquez, M. Deleglise, M. Lacrampe, and P. Krawczak. Thermosetting (bio) materials derived from renewable resources: A critical review. *Progress in Polymer Science*, Vol. 35, pp. 487-509, 2010.
- [2] Libo Yan, Nawawi Chouw, and Krishnan Jayaraman. Flax fibre and its composites - A review. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 56, pp. 296-317, 2014.
- [3] Arthur Monti, « Elaboration et caractérisation mécanique d'une structure composite sandwich à base de constituants naturels ». Thèse de doctorat de l'Université du Maine. 09 décembre 2016.
- [4] Arthur Monti, Abderrahim El Mahi, Zouhaier Jendli, Laurent Guillaumat. Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission. *Composites: Part A*, Vol. 90, pp. 100-110, 2016.
- [5] C. Baley, A. Le Duigou, A. Bourmaud, and P. Davies. Influence of drying on the mechanical behaviour of flax fibres and their unidirectional composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43(8), pp. 1226-1233, 2012.
- [6] C.A. Fuentes, K.W. Ting, C. Dupont-gillain, M. Steensma, A.G. Talma, and R. Zuijderduin. Effect of humidity during manufacturing on the interfacial strength of non-pre-dried flax fibre / unsaturated polyester composites. *Composite Part A*, Vol. 84, pp. 209-215, 2016.
- [7] A.K. Bledzki, J. Gassan, and W. Zhang. Impact properties of natural fibre reinforced epoxy foams. *J. Cell Plast*, Vol. 35, pp. 550-62, 1999.
- [8] Cesim Atas and Cenk Sevim. On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and PVC foam. *Composite Structures*, Vol. 93(1), pp. 40-48, 2010.
- [9] H. Berthelot. *Comportement sous sollicitations dynamiques de composites sandwiches à âme mousse : mécanismes d'endommagement*. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 1997.