



**HAL**  
open science

## Etude du comportement à l'impact et en post impact d'agro-composites renforcés de fibres de lin

Amélie Cuynet, Franck Toussaint, Emile Roux, Manuel Lagache, Daniel  
Scida, Rezak Ayad

► **To cite this version:**

Amélie Cuynet, Franck Toussaint, Emile Roux, Manuel Lagache, Daniel Scida, et al.. Etude du comportement à l'impact et en post impact d'agro-composites renforcés de fibres de lin. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01623265

**HAL Id: hal-01623265**

**<https://hal.science/hal-01623265>**

Submitted on 25 Oct 2017

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

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

## **Etude du comportement à l'impact et en *post impact* d'agro-composites renforcés de fibres de lin**

### ***Experimental study of flax fibre reinforced composites by means of impact and post impact tests***

**Amélie Cuynet<sup>1</sup>, Franck Toussaint<sup>1</sup>, Emile Roux<sup>1</sup>, Manuel Lagache<sup>1</sup>, Daniel Scida<sup>2</sup> et Rezak Ayad<sup>2</sup>**

1 : Laboratoire Systèmes et Matériaux pour la Mécatronique (SYMME)  
Université Savoie Mont Blanc  
F- 74000 Annecy

e-mail : amelie.cuynet@univ-smb.fr, franck.toussaint@univ-smb.fr, emile.roux@univ-smb.fr et manuel.lagache@univ-smb.fr

2 : Laboratoire d'Ingénierie et Sciences des Matériaux (LISM)  
Université de Reims Champagne-Ardenne  
Bâtiment 6, Moulin de la Housse, BP 1039  
F-51687 Reims, Cedex 2

e-mail : daniel.scida@univ-reims.fr et rezak.ayad@univ-reims.fr

### **Résumé**

Les matériaux étudiés dans cet article sont des composites constitués d'une résine époxyde et de renforts tissés de type sergé 2/2 en fibres de lin. Les composites stratifiés sont composés de 4, 6 et 8 plis. Les échantillons ont été réalisés par le procédé de moulage par injection sous vide. L'étude vise à déterminer l'évolution du comportement de ces matériaux sous différents scénarios représentatifs du cycle de vie réel de la structure, incluant des impacts à faible vitesse. Pour cela, les échantillons sont soumis à des cycles d'essais couplant de la fatigue et de l'impact. Les données expérimentales sont analysées et comparées afin de déterminer l'évolution des propriétés mécaniques du matériau après impact et/ou en fatigue.

### **Abstract**

This study aims to analyse flax fiber fabric reinforced epoxy composites. The reinforcement is a 2/2 twill fabric with 100% flax composition. The composites are laminates of 4, 6 and 8 plies in order to analyze 3 different stackings. The objective is to understand the behaviour of these materials under diverse scenarios, getting as close as possible to reality. The samples were manufactured by the infusion vacuum process. They then were submitted to tests coupling fatigue and impact testing. The recovered data were analyzed and compared in order to define the evolution of the mechanical properties of the materials after impact and/or during fatigue testing.

**Mots Clés :** Impact, fatigue, composites à fibres de lin, propriétés mécaniques

**Keywords :** Falling weight impact, fatigue, flax fibre reinforced composites, mechanical properties

## **1. Introduction**

Depuis une dizaine d'années, les matériaux composites à fibres végétales sont de plus en plus utilisés dans les applications industrielles, et particulièrement dans le domaine des sports et loisirs. Bien qu'étant auparavant utilisés uniquement pour des applications non structurelles, ces matériaux commencent à être également affectés à un usage structurel [1]. Les fibres végétales, comme le chanvre et le lin, présentent de nombreux avantages par rapport aux fibres usuelles de type synthétiques. Ces ressources sont renouvelables, biodégradables, nécessitent moins d'énergie à fabriquer, ce qui réduit la dépendance au pétrole ainsi que les émissions de polluants. Il s'agit également de mettre en avant l'avantage de la densité des fibres végétales, par rapport à celle des fibres de verre par exemple, ce qui permet des économies de poids significatives. De plus, elles démontrent de bonnes propriétés thermiques et acoustiques [2][3]. Néanmoins, leur caractère variable dû à leur origine naturelle peut être un frein à leur utilisation. Il est toutefois démontré qu'à l'échelle du composite, cette variabilité n'est pas forcément reproduite, et la dispersion du module d'Young sur des composites tissés est similaire à celle observée sur des composites renforcés en fibres de verre [4][5]. Plusieurs études ont déjà

été réalisées pour caractériser les propriétés de ces composites [1] et en particulier leurs propriétés mécaniques [6][7].

L'étude du comportement à l'impact des composites à fibres végétales est un sujet d'actualité au sein de la communauté scientifique mais demeure encore peu investi. On trouve certains travaux sur le comportement à l'impact de composites à base de fibres de jute [8] confirmant le caractère imprédictible de l'endommagement de ce type de matériaux. D'autres études présentent l'analyse de composites avec des renforts hybrides verre et lin par exemple afin d'obtenir une résistance à l'impact plus importante, réduire la masse des matériaux ainsi que leur impact environnemental [9]. Si la littérature concernant le comportement en fatigue est assez riche [10][11], l'étude mixte fatigue et impact est beaucoup moins fournie même si on peut trouver une thèse consacrée à l'étude du comportement en fatigue avant et après impact de composites tissés chanvre/epoxy [12] tandis que des études de ce type ont déjà été réalisées sur des composites à fibres synthétiques [13][14].

L'objectif de cet article est d'étudier le comportement de matériaux composites à fibres de lin en impact sous différentes conditions d'essai, l'idée étant de se rapprocher le plus possible d'une structure réelle, par exemple du matériel sportif. Le paragraphe 3 présente les deux scénarios imaginés dans ce but, composés d'essais d'impact et de fatigue.

Le paragraphe 2 présente la fabrication du matériau ainsi que le protocole expérimental qui inclut la présentation des essais d'impact, des essais de flexion 3 points quasi-statiques et des essais de flexion 3 points dynamiques. Finalement, les résultats sont présentés et discutés, incluant des comparaisons entre le comportement des échantillons soumis à des impacts ou non, ainsi qu'à une fatigue éventuelle, avant de conclure.

## **2. Matériaux et protocole expérimental**

### **2.1. Matériaux et mise en oeuvre**

Les composites sont mis en oeuvre à partir d'un tissu de fibres de lin et d'une résine époxyde SR8100 associée au durcisseur SD8822 (proportion en masse : 100/31). Le tissu est un sergé 2/2 dont le grammage est de  $330 \text{ g/m}^2$ , et sa masse volumique est de  $1450 \text{ kg/m}^3$  (données fournisseur). Des stratifiés constitués de 4, 6 et 8 couches ont été réalisés au LISM (à l'IUT de Troyes) par le procédé de moulage par injection sous vide. Ce procédé consiste à mettre sous vide à l'aide d'une bâche plusieurs couches de renforts secs empilées et de les imprégner par la suite avec de la résine, l'imprégnation se faisant par aspiration créée par une dépression. La valeur de cette dépression est fixée à 0,6 bar, cette valeur ayant une influence sur le taux de fibres présentes dans la plaque. Cette technique nécessite un filet de drainage pour solutionner les problèmes de flux de résine, un film séparateur perforé et un tissu d'arrachage. Après infusion, le cycle de polymérisation préconisé par le fabricant a été respecté, à savoir une 1<sup>ère</sup> réticulation sous vide et à température ambiante pendant 24 heures suivie d'une 2<sup>nde</sup> pendant 16 heures à  $60^\circ\text{C}$ . La fraction volumique des fibres de lin de la plaque réalisée est de  $28 \pm 2\%$  ; celle-ci est calculée à partir des masses des fibres et de la plaque, de la masse volumique de la fibre de lin et de celle de la résine. Les plaques réalisées sont rectangulaires ( $400 \times 300 \text{ mm}^2$ ). Les échantillons sont ensuite découpés dans les plaques avec une scie à fil. Deux types d'échantillons sont préparés : des éprouvettes carrées ( $120 \times 120 \text{ mm}^2$ ) adaptées au dispositif d'impact et des éprouvettes rectangulaires ( $120 \times 20 \text{ mm}^2$ ) adaptées aux essais de flexion.

### **2.2. Essais d'impact**

Les essais d'impact à basse vitesse sont réalisés sur une machine d'essai de type tour de chute (figure 2) développée au laboratoire SYMME à Annecy. Le dispositif est constitué d'une masse tombante guidée en translation sur une poutre verticale de 2,3 m de hauteur solidaire du bâti de la machine. L'échantillon bridé sur un ensemble matrice, serre-flanc est impacté sur sa face supérieure par un impacteur hémisphérique de 14 mm de diamètre. La vitesse d'impact est déterminée au moyen d'une

technique d'analyse d'images utilisant une caméra numérique rapide PHOTRON FASTCAM SA3 et le logiciel de corrélation d'images numériques 7D [15].

L'énergie cinétique  $E_c$  de l'impact est calculée à partir de la vitesse d'impact  $v$  et la masse de l'impacteur  $m$  selon l'équation :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

Un protocole expérimental préparatoire à tout essai a été élaboré afin de quantifier le niveau d'énergie d'impact en fonction des paramètres machines et ce afin de pouvoir s'affranchir des frottements au niveau du système de guidage. En effet, dans le cas d'une chute libre, il est aisé de calculer l'énergie d'impact ( $E_c = mgh$ ), mais dans le cas de notre tour de chute, le système de guidage présente des frottements à prendre en compte dans l'estimation de l'énergie. Pour calibrer la tour, des essais préliminaires ont été réalisés avec 3 masses différentes ( $m_0 = 0,91$  kg,  $m_1 = 1,93$  kg et  $m_2 = 2,95$  kg). Afin de vérifier la répétabilité des essais, le plateau est à chaque fois lâché de la même hauteur deux fois d'affilée. Les hauteurs testées varient entre 14 et 146 cm.

La figure 1 présente les droites reliant l'énergie d'impact à la hauteur de chute pour chaque masse. Outre une bonne reproductibilité des essais, on constate que la relation entre l'énergie et la hauteur de chute est linéaire, ce qui est synonyme de frottements visqueux négligeables sur la plage de mesures testée. On estime par ailleurs que l'incertitude sur l'énergie d'impact reste inférieure à 1 Joule. Une régression linéaire est effectuée pour chacun des cas (équations sur la Fig. 1) et les équations obtenues seront utilisées par la suite pour calculer les énergies d'impact selon la hauteur de chute définie pour l'essai.

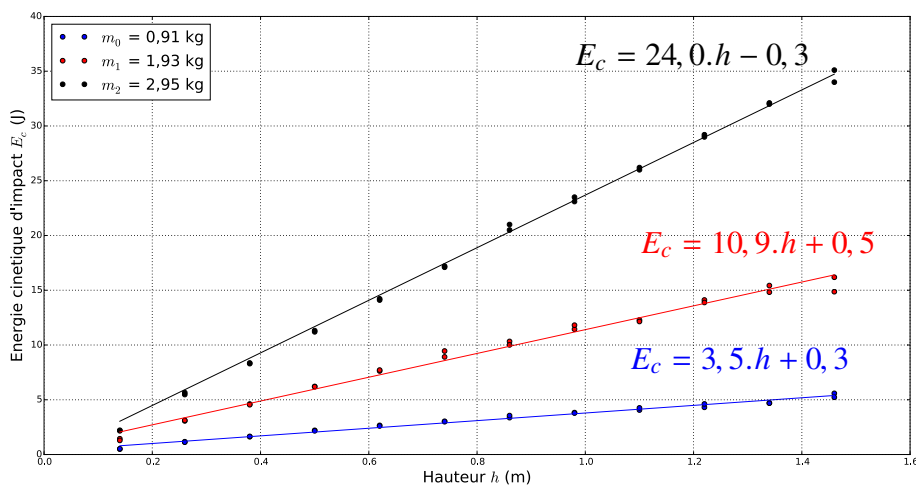


Fig. 1. Energie cinétique d'impact en fonction de la hauteur de chute et de la masse de l'impacteur

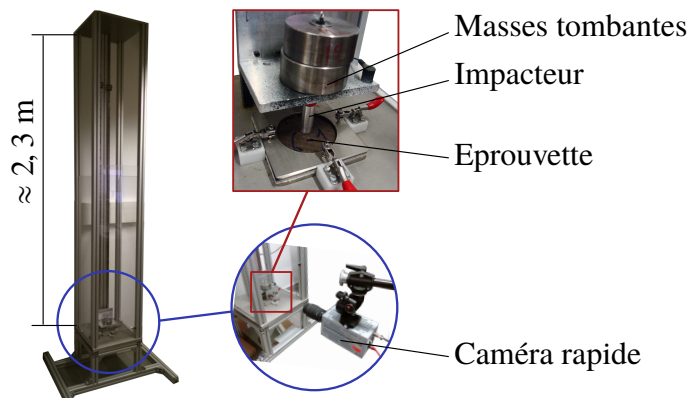


Fig. 2. Dispositif expérimental d'impact

Les échantillons ont été préalablement testés en impact. La figure 3 présente l'énergie d'impact de perforation en fonction du nombre de plis des échantillons. On constate que cette énergie varie entre 15 et 35 Joules et qu'elle n'est pas proportionnelle au nombre de plis. Dans le cadre des scénarios, nous avons choisi de faire les essais d'impact avec une énergie de 10 Joules car elle se situe dans tous les cas (4, 6 et 8 plis) en-dessous de la valeur de l'énergie de perforation. On utilise la masse  $m_1$  pour ces essais, donc la masse sera à chaque fois lâchée de la hauteur  $h = 0,87m$ .

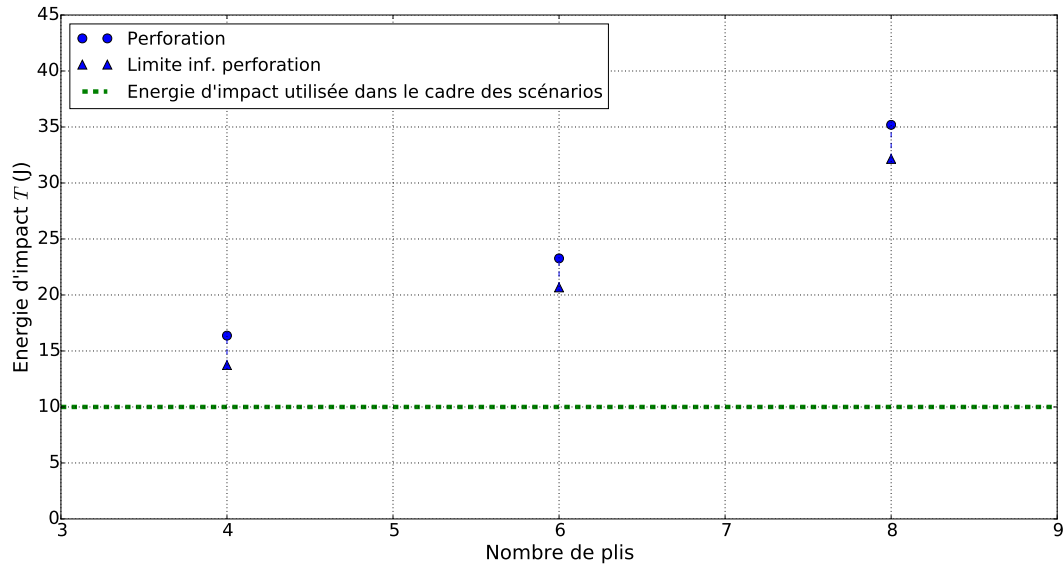


Fig. 3. Détermination des énergies de perforation et choix de l'énergie utilisée dans le cadre des scénarios

### 2.3. Essais de flexion 3 points quasi-statiques

Les essais de flexion 3 points (Fig. 4) sont utilisés à la fois pour caractériser les échantillons (propriétés mécaniques), et pour préparer les essais de fatigue. Ils sont réalisés sur une machine de traction INSTRON 5569 équipée d'une cellule de charge de 50 kN (précision : 0,5% de la charge) permettant d'enregistrer l'effort exercé sur l'éprouvette avec une fréquence d'acquisition de 1 Hz. La vitesse de déplacement de la traverse est imposé à 5 mm/min. Les trois grandeurs force, temps et déplacement de la traverse sont enregistrées par la machine au cours de l'essai par le biais du logiciel Bluehill. Les essais de flexion sont réalisés afin de calculer la contrainte à la rupture ainsi que le module en flexion des échantillons.

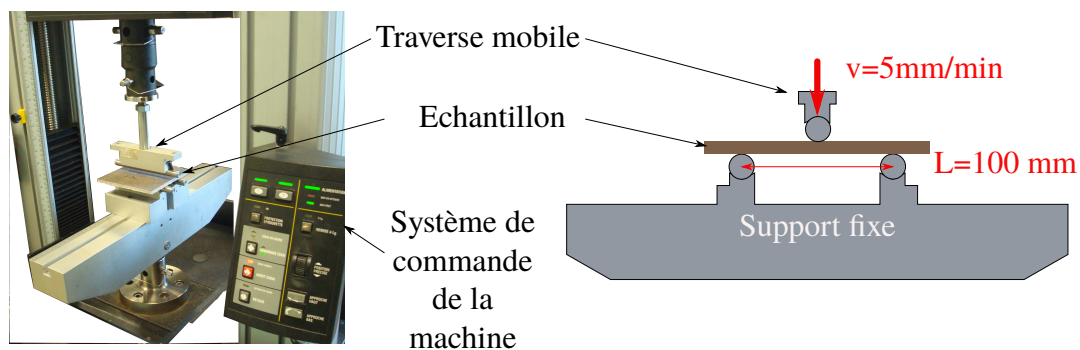


Fig. 4. Machine de flexion 3 points quasi-statique

Pour vérifier la répétabilité des essais et économiser des échantillons, on choisit de travailler avec des échantillons rectangulaires et non carrés. Les dimensions des éprouvettes respectent les hypothèses de la théorie des poutres. Cinq essais sont réalisés à chaque fois afin de vérifier la répétabilité sur chaque lot. La contrainte  $\sigma$  au centre de l'échantillon est calculée selon l'équation Eq. 2.

$$\sigma = \frac{3FL}{2le^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

où  $F$  est la force,  $L$  est l'écartement des supports,  $l$  correspond à la largeur de l'échantillon et  $e$  est son épaisseur.

La contrainte à rupture est calculée pour chacun des 5 essais et on choisit la valeur médiane pour éviter qu'un échantillon défectueux n'affecte les résultats. De même, afin de pouvoir tracer les courbes contrainte / déformation permettant de calculer le module de flexion élastique, il est nécessaire de calculer la déformation  $\varepsilon$ . Elle est calculée selon l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{6es}{L^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

où la flèche est notée  $s$ , l'épaisseur  $e$  et l'écartement des supports  $L$ .

Pour pouvoir calculer la force à appliquer sur les plaques carrées à partir des résultats des échantillons rectangulaires, il est nécessaire d'utiliser la théorie des plaques à la place de la théorie des poutres. L'équation Eq. 2 devient :

$$\sigma = \frac{3FL}{2le^2}(1 - \nu^2) \quad (\text{Eq. 4})$$

Il apparaît un facteur  $(1 - \nu^2)$  qui permet de prendre en compte le fait que la plaque n'a plus la possibilité de s'étendre librement sur les côtés. La valeur du coefficient de Poisson  $\nu$  utilisée pour les calculs qui suivent est calculée de manière empirique en testant des plaques de plusieurs lots et en comparant les résultats avec ceux des échantillons rectangulaires. Il a été estimé que  $\nu = 0,20$ .

#### 2.4. Essais de flexion 3 points dynamiques - fatigue

Les essais de fatigue sont utilisés à la fois pour simuler le vieillissement mécanique de la structure (scénario 2) et pour caractériser le matériau (sain, impacté et/ou fatigué). Ces essais de fatigue sont réalisés sur le dispositif de flexion 3 points d'une machine de fatigue BOSE (figure 5) associée au logiciel d'acquisition WinTest 7. Le dispositif de maintien de l'éprouvette est similaire à celui utilisé en flexion statique, hormis le fait que l'appui central se situe en-dessous de l'échantillon et non au-dessus comme c'était le cas pour la machine INSTRON (l'échantillon est donc retourné pour toujours être sollicité de la même manière). L'écartement des supports est maintenu à 100 mm. La machine est pilotée en force avec des cycles de forme sinusoïdale. La force maximale appliquée  $F_{max}$  est calculée à partir de la contrainte à rupture calculée pour chaque lot lors des essais de flexion statique. Le rapport de charge  $R = \frac{F_{max}}{F_{min}}$  est fixé à 10%.

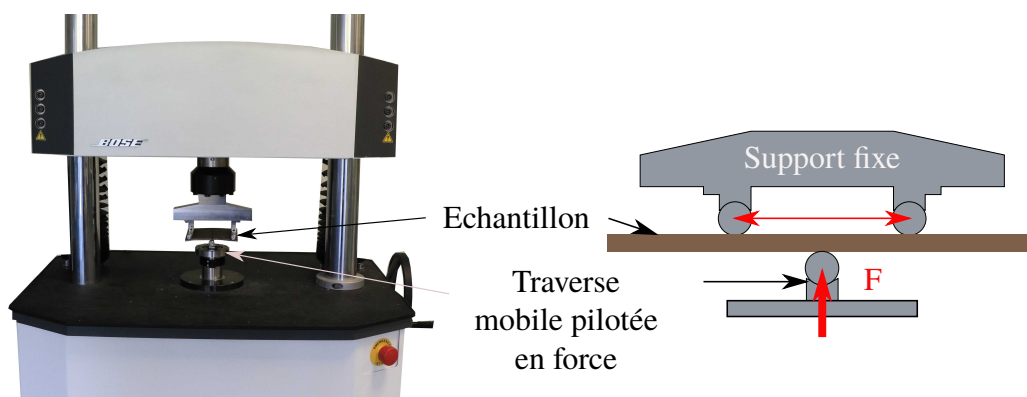


Fig. 5. Machine de flexion 3 points dynamique

L'échantillonnage des données est fixé à 500 points par cycle tous les 100 cycles indiquant le nombre de cycles, le temps, le déplacement traverse et la force ainsi que l'intégralité des 60 derniers cycles de

l'essai. Un autre fichier permet quant à lui d'obtenir les informations temps, déplacement minimum, déplacement maximum, force minimum et force maximum pour chaque cycle.

### 3. Présentation des scénarios

#### 3.1. Scénario 1

Le premier scénario a pour but d'analyser la dégradation des caractéristiques du matériau suite à un impact. Dans une situation réelle, on imagine un canoë qui vient d'être acheté et qui est impacté avant d'être utilisé : la tenue mécanique de la structure est-elle alors suffisante pour garantir sa pérennité ? Pour représenter cette situation de manière expérimentale et contrôlée, on considère une éprouvette carrée saine à laquelle on va faire subir un essai d'impact d'une énergie de 10 Joules (Fig. 6), et on caractérisera ensuite le matériau (module de flexion élastique, contrainte à rupture).

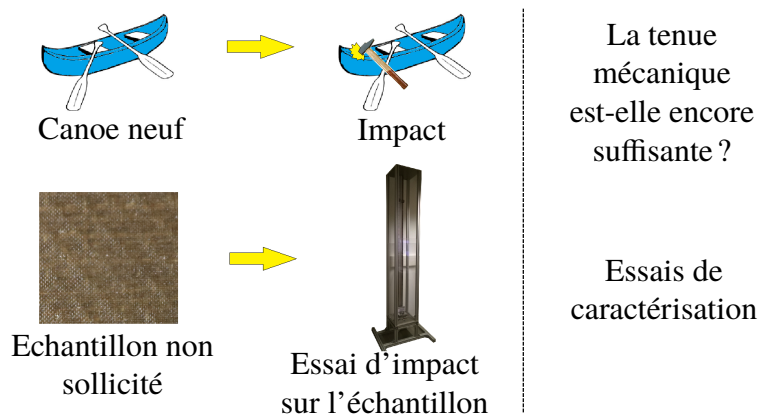


Fig. 6. Scénario 1

Pour assurer la répétabilité de l'essai, plusieurs échantillons subissent ce scénario. Ils sont ensuite caractérisés soit à l'aide d'un essai de flexion 3 points quasi-statique, soit à l'aide d'un essai de fatigue également en flexion 3 points mené jusqu'à la rupture du matériau. Les informations telles que le module de flexion, la contrainte à la rupture en flexion et le nombre de cycles à rupture seront mesurées et comparées aux résultats obtenus avec une éprouvette saine.

#### 3.2. Scénario 2



Fig. 7. Scénario 2

Le second scénario intègre la notion de vieillissement au travers d'une fatigue mécanique de la structure. Pour être plus réaliste, on considère que le canoë a déjà été utilisé avant d'être impacté.

Pour traduire cette situation de manière expérimentale, l'échantillon est d'abord sollicité en fatigue en flexion 3 points sans aller jusqu'à rupture pour représenter la phase d'utilisation du canoë, puis il est impacté avec une énergie de 10 Joules (Fig. 7).

## 4. Résultats et discussion

### 4.1. Contrainte à la rupture et module élastique en flexion quasi-satique

La figure 8 présente les résultats obtenus pour chaque empilement soumis aux trois différentes situations (échantillon sain, scénario 1 et scénario 2). La valeur de la contrainte à rupture  $\sigma_0$  de l'échantillon sain a été prise comme référence et ainsi, la valeur  $\frac{\sigma_{rupture}}{\sigma_0}$  a été calculée pour chaque situation et pour chaque empilement. Comme on pouvait s'y attendre, on observe que l'impact a une forte influence sur les performances des plaques constituées de 4 plis, la valeur de la contrainte à rupture ayant été divisée par deux dans le cas du scénario 1 et ayant diminué de 60% pour le scénario 2. L'empilement à 6 plis a moins subi l'endommagement mais ses propriétés diminuent respectivement de 30 et 37% dans le cadre des scénarios 1 et 2, tandis que pour le 8 plis, on a une perte de 21 et 23%. On constate également que la fatigue appliquée sur le matériau en amont de l'essai d'impact a une influence moindre quand on augmente le nombre de plis même si les essais de fatigue ont tous été réalisés avec une contrainte maximale imposée à 70% de  $\sigma_0$  et avec un nombre de cycles imposés identiques pour les trois empilements (3000 cycles).

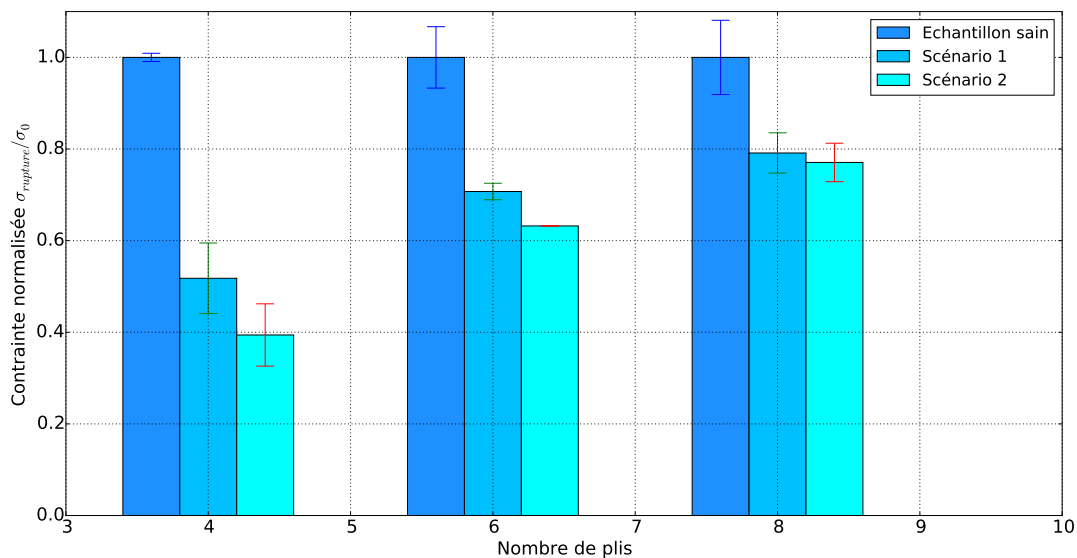


Fig. 8. Contrainte à rupture des 3 empilements en fonction de la situation (échantillon sain, scénario 1 et scénario 2)

Grâce aux essais de flexion 3 points quasi-statiques, il est également possible de déterminer le module de flexion élastique pour chaque essai. Pour le calculer, on utilise la formule Eq. 5 en prenant  $\varepsilon_1 = 0.0005$  et  $\varepsilon_2 = 0.0025$  et les valeurs de contrainte  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  correspondant respectivement à chaque niveau de déformation :

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (\text{Eq. 5})$$

Les résultats sont présentés dans la figure 9. La tendance observée est similaire à celle constatée pour la contrainte à la rupture. Le module de flexion élastique est modifié par l'impact et la fatigue appliqués sur le matériau, en comparaison du module  $E_0$  de l'échantillon sain. C'est particulièrement flagrant pour le composite à 4 plis. En ce qui concerne les plaques de 6 et 8 plis, la diminution est plus faible



en raison de l'épaisseur qui augmente. On note toutefois que les modules sont moins altérés que les contraintes à rupture si on compare ces résultats avec ceux de la contrainte à la rupture.

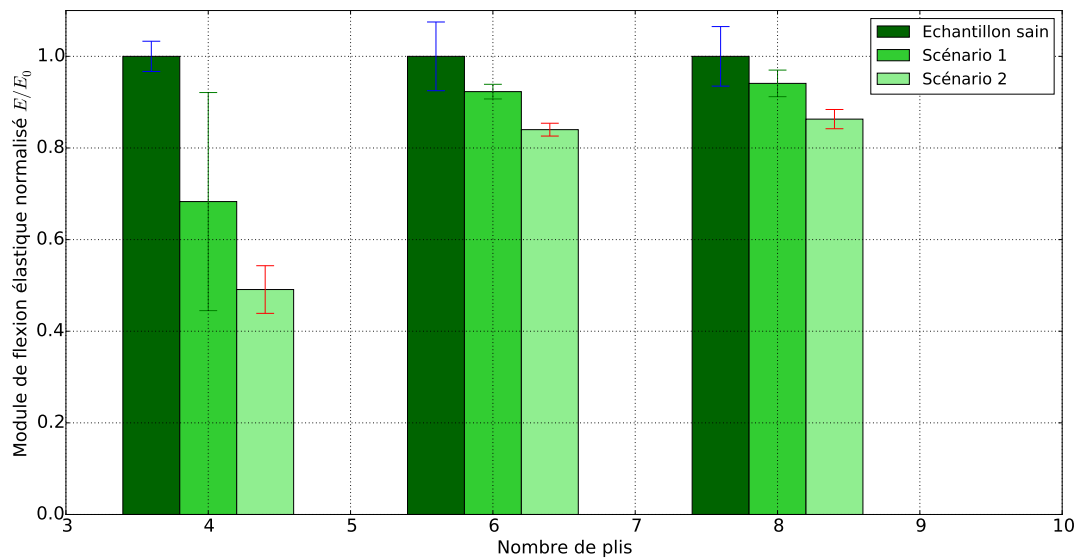


Fig. 9. Module normalisé des 3 empilements en fonction de la situation (échantillon sain, scénario 1 et scénario 2)

#### 4.2. Caractérisation en fatigue

Les résultats des essais de fatigue sont présentés sur la figure 10. Sur la figure de gauche, les résultats sont exposés sous la forme de courbes de Wöhler. On peut observer la répartition des points expérimentaux avec le nombre de cycles en abscisse et le ratio  $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{rupture}}$  en ordonnée avec  $\sigma_{max}$  la valeur de contrainte maximale imposée lors de chaque essai de fatigue et  $\sigma_{rupture}$  la contrainte à rupture des échantillons sains. Sur la figure de droite, les mêmes résultats sont présentés (un zoom est effectué sur la plage de  $10^3$  à  $10^5$ ), et on a appliqué le modèle de Basquin [16] aux résultats, modèle défini à l'équation Eq. 6. Il donne une relation entre le logarithme du nombre de cycles à rupture ( $N$ ) et le logarithme de  $\sigma_{max}$ .  $C$  et  $m$  sont des paramètres dépendant des matériaux et sont déterminés par régression linéaire. Les résultats normalisés sont tracés séparément pour les trois différentes épaisseurs : l'équation Eq. 6 a été appliquée sans être modifiée pour le 8 plis, les résultats se retrouvent donc entre 0 et 1 en abscisse ; en ajoutant 1 à la valeur de  $\log(N)$ , les résultats du composite à 6 plis sont décalés avec des valeurs entre 1 et 2 et enfin, en ajoutant 2 aux résultats du composite à 4 plis, on les observe donc entre 2 et 3.

$$\log(N) = \log(C) - m \cdot \log\left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{rupture}}\right) \quad (\text{Eq. 6})$$

En théorie, une courbe de Wöhler est divisée en trois zones : la zone de fatigue oligocyclique avec une pente très faible, la zone de fatigue limitée et la zone de fatigue illimitée. Le modèle de Basquin ne s'applique qu'à la partie centrale, c'est-à-dire la zone de fatigue limitée. La frontière entre la fatigue oligocyclique et la fatigue limitée n'ayant pas été encore déterminée par l'expérimentation, on la place sur les dix premiers cycles, ordre de grandeur que l'on retrouve dans la littérature. Les résultats exposés ne représentent donc que la partie centrale et le modèle présenté permet d'obtenir une première approximation du comportement en fatigue de ces matériaux mais reste peu précis en raison de la quantité de résultats expérimentaux qui est à augmenter.

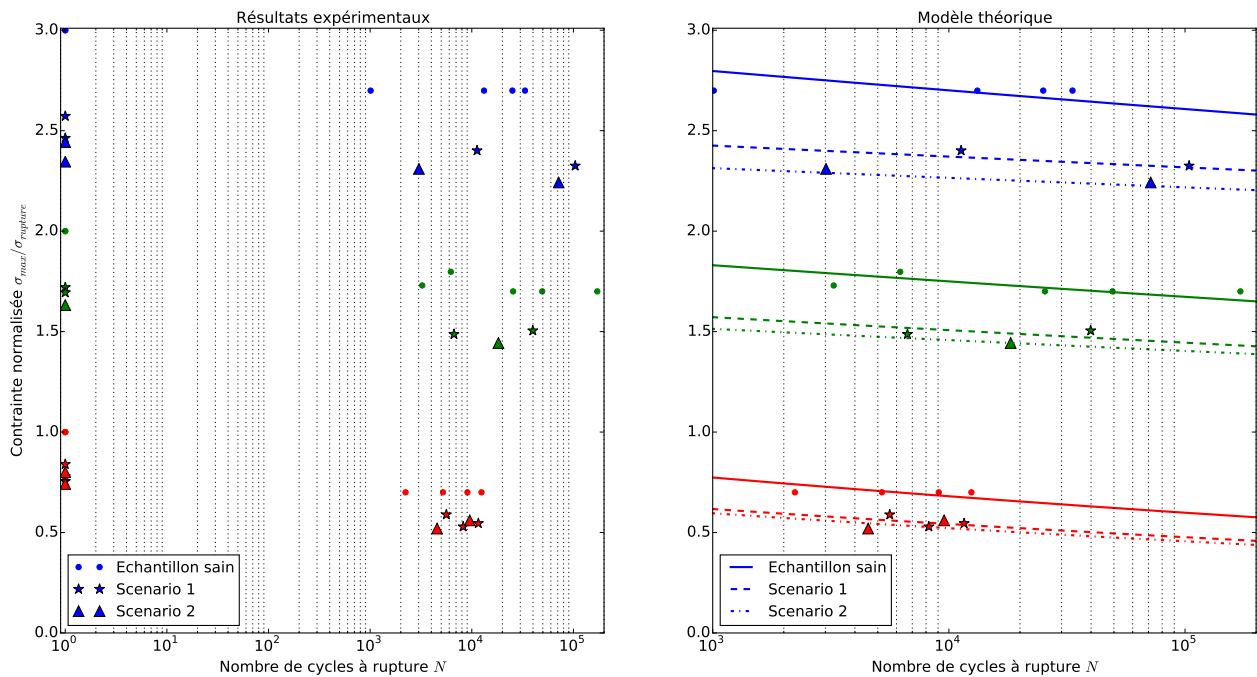


Fig. 10. Résultats des essais de fatigue (4 plis en bleu, 6 plis en vert et 8 plis en rouge)

Ces résultats mettent en évidence une résistance en fatigue bien plus faible pour l'empilement 4 plis lorsqu'il subit le scénario 1 ou 2. La différence entre les deux scénarios est également bien marquée. En observant les résultats pour le 6 plis, on voit également une diminution des propriétés mécaniques, mais elle est moindre que dans le cas du 4 plis, et la courbe du scénario 2 se rapproche plus de celle du scénario 1. Enfin, sur le 8 plis, les courbes sont encore plus proches et celles des scénarios 1 et 2 sont presque confondues.

On observe aussi que le nombre de cycles réalisés par les échantillons vieillis (par impact et fatigue) à 70% de la contrainte à rupture mesurée pour chaque scénario est du même ordre de grandeur que le nombre de cycles réalisés par l'échantillon sain à 70% de sa contrainte à rupture.

On peut constater une dispersion assez importante sur le nombre de cycles à rupture pour un niveau de charge de fatigue donné. Elle est probablement causée par la dispersion caractéristique des essais de fatigue associée à la dispersion naturelle des caractéristiques des différentes plaques composites. Néanmoins, on observe quand même une tendance qui va vers l'augmentation du nombre de cycles lorsque l'on diminue la charge maximale imposée.

Les résultats pour chaque empilement et situation différents sont encore peu nombreux et il sera nécessaire de faire des essais complémentaires afin d'avoir un modèle plus complet pour les courbes de Wöhler et pour mieux situer les différentes zones qui constituent ces courbes (zone de fatigue oligocyclique et zone d'endurance limitée en particulier).

## 5. Conclusion

Les essais présentés dans cet article permettent d'avoir une première idée du comportement des composites à fibres de lin dans le cadre des 2 scénarios choisis. Les résultats ont notamment bien mis en évidence l'influence de l'impact et la fatigue sur les propriétés mécaniques des échantillons et leur évolution pour différentes épaisseurs avec une même énergie d'impact.

Néanmoins, il est encore nécessaire de compléter le modèle présenté avec d'autres essais afin d'assurer une bonne répétabilité ainsi que de compléter les zones inconnues (fatigue oligocyclique et fatigue illimitée) sur les courbes de Wöhler présentées.

Il pourra également être intéressant de compléter les scénarios présentés dans cet article avec une analyse du comportement de ces matériaux lorsqu'ils sont soumis à une hygrométrie élevée ou à une immersion dans l'eau, les scénarios de cette étude étant basés sur l'étude d'un canoë.

## Références

- [1] L. Yan, N. Chouw, K. Jayaraman « Flax fibre and its composites - A review », *Composites Part B : Engineering* Vol. 56, pp. 296–317, 2014.
- [2] D. B. Dittenber, H. V. GangaRao « Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 43 n° 8, pp. 1419 – 1429, 2012.
- [3] K. Pickering, M. A. Efendy, T. Le « A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 83, pp. 98 – 112, 2016.
- [4] J. Blanchard, A. Sobey, J. Blake « Multi-scale investigation into the mechanical behaviour of flax in yarn, cloth and laminate form », *Composites Part B : Engineering* Vol. 84, pp. 228–235, 2016.
- [5] D. Shah « Natural fibre composites : Comprehensive Ashby-type materials selection charts », *Materials & Designs (1980-2015)* Vol. 62, pp. 21–31, 2014.
- [6] A. Cuynet, F. Toussaint, E. Roux, D. Scida, R. Ayad « Apport des mesures de champs dans l'étude de composites renforcés en fibres de lin au cours d'essais de traction quasi-statiques », in : 1<sup>ère</sup> Conférence EuroMaghrébine des BioComposites, Marrakech, , pp. 1–8, 2016.
- [7] C. Baley « Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites », *Techniques de l'Ingénieur, Matériaux | Plastiques et Composites* Vol. AM 5130 v2.
- [8] C. Santulli « Mechanical and impact properties of untreated jute fabric reinforced polyester laminates compared with different e-glass fibre reinforced laminates », *Science and Engineering of Composite Materials* Vol. 9, pp. 177–188, 2000.
- [9] C. Santulli, M. Janssen, G. Jeronimidis « Partial replacement of E-glass fibers with flax fibers in composites and effect on falling weight impact performance », *Journal of Materials Science* Vol. 40, pp. 3581–3585, 2005.
- [10] S. Liang « Etude de comportement en fatigue des composites renforcés par fibres végétales. Prise en compte de la variabilité des propriétés », Ph.D. thesis, Université de Bourgogne, 2012.
- [11] A. Elouar, Z. Aboura, R. Ayad, H. Sabhi, M. Benzeggagh « Suivi de l'endommagement en fatigue des composites à base de fibres végétales », *Comptes Rendus des JNC 16* .
- [12] D. S. D. Vasconcellos « Comportement en fatigue avant et après impact de composites tissés chanvre/époxy », Ph.D. thesis, ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers, 2013.
- [13] N. Tai, C. Ma, J. Lin, G. Wu « Effects of thickness on the fatigue-behavior of quasi-isotropic carbon/epoxy composites before and after low energy impacts », *Composites Science and Technology* Vol. 59, pp. 1753–1762, 1999.
- [14] M. Beheshty, B. Harris, T. Adam « An empirical fatigue-life model for high-performance fibre composites with and without impact damage », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 30, pp. 971–987, 1999.
- [15] P. Vacher, S. Dumoulin, F. Morestin, S. Mguil-Touchal « Bidimensional strain measurement using digital images », *Proceedings of the IMechE, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science* , pp. 811–817, 1999.
- [16] N. E. Dowling, *Mechanical behavior of materials*, Englewood Cliffs (NJ), Prentice Hall, 1993.