



## " Optimisation des propriétés mécaniques d'une structure sandwich à base de fibres de lin"

"ESSID Safa "<sup>1</sup>,

"BIZET Laurent"<sup>1</sup>,

"SAOUAB Abdelghani"<sup>1</sup>

<sup>1</sup> " Université du Havre Normandie, Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, FRANCE,  
safa.essid@univ-lehavre.fr, laurent.bizet@univ-lehavre.fr, abdelghani.saouab@univ-lehavre.fr "

### Résumé :

Les éco-composites constituent une alternative intéressante à certains types de matériaux classiques, tout en répondant aux exigences réglementaires, aux contraintes écologiques et en donnant des propriétés mécaniques spécifiques intéressantes. Les matériaux éco-composites peuvent être utilisés pour former des panneaux sandwich. L'objectif de cette étude est de se doter de moyens pour l'optimisation de la conception de ces structures à travers ses constituants : les peaux et l'âme. Il s'agit à travers ce travail de valoriser les produits de la tige de lin d'une part l'utilisation des fibres de lin en guise de renfort pour les peaux, imprégnées de résine thermodurcissable semi-biosourcée et, d'autre part, l'exploitation des anas de lin pour la réalisation de l'âme. Ce travail s'appuie sur une démarche expérimentale, reliant les matières premières, les procédés de mise en œuvre et les propriétés mécaniques recherchées. Il s'ensuit une caractérisation mécanique d'un nouveau matériau d'âme.

**Mots clés** : Eco-composites, Structure Sandwich, Fibres de lin, Anas de lin, Optimisation de conception, Propriétés mécaniques

## 1. Introduction

Le développement de nouveaux matériaux comme une alternative aux matériaux en voie d'épuisement et aux matériaux synthétiques, potentiellement dangereux pour la santé humaine et environnementale, est indispensable [1]. Les matériaux composites renforcés de fibres végétales (lin, chanvre, etc.) constituent un potentiel intéressant pour la protection de l'environnement [2], l'exploitation des ressources locales en Europe et notamment en France [3] et le développement de l'économie régionale [4]. De plus, certaines fibres végétales telles que le lin, possèdent des propriétés spécifiques comparables à celles des fibres synthétiques telles que les fibres de verre [5-6]. Néanmoins, la valorisation de la plante entière du lin se réduit essentiellement à l'exploitation des fibres, pour la fabrication des structures utilisées dans diverses applications notamment le transport [7]. A part les fibres de lin, les coproduits de cette plante, notamment les anas de lin, très peu valorisés dans l'industrie mécanique, constituent un choix possible pour le développement durable [8-9].

L'objectif de cette étude purement expérimentale est d'optimiser la conception de structures sandwich à travers l'optimisation de ses constituants, dont les peaux sont à base de résine GreenPoxy56 biosourcée renforcée par des fibres de lin unidirectionnelles et dont l'âme est à base d'anas de lin. Ces structures doivent répondre à des propriétés mécaniques spécifiques, adaptées à des applications bien définies.

## 2. Matériaux et méthodes

### 1. Matières premières

Les renforts employés dans cette étude sont des fibres et des anas de lin (*linum usitatissimum*) cultivé en Normandie. Les fibres de lin utilisées pour les peaux se présentent sous la forme d'un voile unidirectionnel fourni par Depestele (France) avec un grammage de 200g/m<sup>2</sup>. Les anas de lin (Paillis de Lin, Depestele), coproduits issus du teillage du lin, sont employés pour les âmes. Ils présentent une longueur comprise entre 5 et 24 mm et une densité déterminée par pycnométrie de 148 kg/m<sup>3</sup>.

La résine époxyde utilisée, Greenpoxy56 (Sicom, France), contient jusqu'à 56% de matière biosourcée d'origine végétale.

### 2. Procédés de mise en œuvre des matériaux

L'optimisation des propriétés mécaniques d'une structure sandwich nécessite l'optimisation de ses constituants : les peaux et l'âme.

#### 1. Peaux en composite

Une série de peaux en fibres de lin-Greenpoxy56 ont été élaborées par infusion. Les UD sont d'abord étuvés à 90°C pendant 3 heures. Ensuite, quatre plis sont superposés sur un moule préalablement ciré et recouverts d'un tissu d'arrachage, d'un drainant et d'une bâche à vide. La résine GreenPoxy56 est utilisée avec le catalyseur SD8822, approprié au procédé d'infusion en termes de fluidité et de temps de réticulation. L'infusion se fait rapidement pour éviter l'absorption d'eau par les fibres de lin [10] à 0,5 bars. Cette dépression est maintenue jusqu'à la polymérisation de la résine. Le démoulage se fait après 24 heures. Les éprouvettes découpées sont post-cuites à 60°C pendant 4 heures. Des mesures de masse à l'air et dans l'eau des éprouvettes ont été effectuées, afin de déterminer la densité du composite, le taux volumique des fibres et de porosité. Les résultats trouvés sont résumés dans le tableau 1.

$d_c$	$V_f$	$V_p$
1,157	29 %	6%

Tableau 1. La densité et le taux volumique des différents constituants des peaux composite fabriquées

## 2. Panneaux agglomérés

Deux techniques d'élaboration d'âmes ont été développées : le moulage et la thermocompression.

Les panneaux élaborés par moulage sont obtenus à partir d'un mélange anas-résine greenpoxy56 catalysée par le SD8822. Les taux volumiques des anas et de la résine sont variés par rapport au volume du moule dans le but de trouver le bon compromis entre une bonne adhésion des anas de lin et une légèreté des panneaux fabriqués. Le moulage des constituants et le remplissage du moule se fait manuellement. La fermeture du moule assure un certain compactage et le moule est maintenu vertical pour éviter la différence au niveau de l'état des surfaces supérieure et inférieure.

L'intérêt d'utiliser la thermocompression pour la fabrication des âmes est de réduire davantage le taux volumique de la résine par rapport au volume total du moule. Des pourcentages en volume de 90% et 95% d'anas pour respectivement 10% et 5% de résine ont été testés. Les anas et la résine avec catalyseur sont mélangés manuellement. L'ensemble est déposé dans le moule, puis la presse comprime le moule afin d'avoir une épaisseur de matériau égale à 10 mm. La fermeture du moule entraîne une compaction importante du matériau de l'ordre de 1,6 MPa. Cette pression finit par s'annuler après 1 minute de chauffage à 90°C. Le maintien du chauffage à 90°C dure 10 minutes, puis le refroidissement est effectué jusqu'à température ambiante en moins de 8 minutes.

## 3. Essais mécaniques des matériaux composites fabriqués

Les éprouvettes des peaux en fibres de lin et des âmes en anas ont été testées en traction et en compression dans des conditions normales de température et d'humidité (~20°C, ~50% HR).

### 1. Comportement en traction des stratifiés et de la résine

Les peaux composite à fibres de lin ainsi qu'une plaque en Grennpoxy56 sont découpées en éprouvettes de forme rectangulaire et de dimensions 250\*25\*2 mm, selon la norme AFNOR NF EN ISO 527. La découpe des stratifiés a été réalisée dans différentes orientations des fibres 0°, 45° et 90° par rapport à la direction de la traction afin de déterminer les modules d'élasticité longitudinal et transversal et le module de cisaillement. Après découpe, les éprouvettes ont été séchées dans une étuve à une température de 60°C pendant 4 heures. Au moins 5 essais de traction par type d'éprouvette sont réalisés sur une machine INSTRON modèle 5867 équipée d'un capteur d'effort de 30KN et d'un extensomètre longitudinal, à une vitesse de 1mm/min.

### 2. Comportement en compression des panneaux agglomérés

Des essais de compression à la fois sur les anas de lin en vrac, pour avoir une idée sur leur compressibilité et sur des blocs prélevés des panneaux de particules fabriqués, vu leur utilisation en tant qu'âme pour les structures sandwich à fabriquer, sont entrepris. En effet, l'âme d'un sandwich est fortement sollicitée en compression lors du transfert de charge d'une peau à l'autre. Pour cela, des blocs de 50\*50\*30 mm<sup>3</sup> contenant uniquement des particules d'anas de lin et des blocs de section 50\*50mm<sup>2</sup> prélevés des panneaux agglomérés par moulage et par thermocompression sont comprimés selon la norme ASTM C365 sur la machine INSTRON 5867, à une vitesse égale à 0,25mm/min.

## 3. Résultats et discussion

## 1. Comportement en traction de la résine et des peaux en composites

La courbe contrainte-déformation présentée en figure 1 représentative de l'ensemble des courbes obtenues pour les éprouvettes en greenpoxy56, montre un comportement élastique avec un module d'élasticité de 3580MPa, avant de se rompre brutalement pour une faible déformation de 1,26%. Ce type de comportement traduit la structure tridimensionnelle fortement réticulée de la résine, qui empêche toute déformation.

Le renforcement de la greenpoxy56 par des fibres de lin unidirectionnelles reste élastique pour les orientations de fibres à 90° ou à 45° par rapport à la direction de traction. Néanmoins, l'analyse de courbe contrainte-déformation présentée sur la même figure met en évidence l'augmentation du module d'élasticité de 23% et la baisse de la contrainte et de la déformation à la rupture. Cette baisse des propriétés à la rupture est due à cause d'une gêne à la réticulation : En effet, la migration des composants non-cellulosiques issus des fibres naturelles vers les fonctions époxy et les fonctions amines du catalyseur gêne la réticulation de la résine [11]. En plus, l'absorption du catalyseur par les fibres naturelles provoque une diminution de sa concentration, ce qui affecte la réticulation [12].

Les éprouvettes d'orientation des fibres égale à 45° par rapport à la direction de traction permettent de déterminer le module en cisaillement  $G_{12}$  à travers la pente de la courbe contrainte-déformation en cisaillement présentée en figure 2. Le module déterminé vaut 11GPa [13].

Les courbes contrainte-déformation des éprouvettes UD-0°, présentées figure 2, mettent en évidence une certaine hétérogénéité du matériau vu la dispersion des résultats au niveau de la contrainte à la rupture mais l'écart-type reste raisonnable (7,1%). Ces courbes de traction présentent trois zones différentes :

- une première zone élastique linéaire très courte, qui correspond à une réorganisation des fibrilles de cellulose. Cette zone permet de déterminer le module apparent d'élasticité.
- une non-linéarité de la courbe accompagnée d'une chute du module d'élasticité. Ceci correspond à une déformation élasto-visco-plastique des fibres unitaires de lin et plus précisément de la couche S2 de la paroi secondaire [14].
- une reprise de la linéarité jusqu'à la rupture.

Tenant compte de la présence de deux zones linéaires, certains auteurs proposent de considérer la pente de la deuxième zone comme le module d'élasticité réel, en considérant que celle-ci correspond plus à la gamme de travail du matériau composite [15]. Néanmoins, Poilane et al. ont montré que le module apparent d'élasticité déterminé à partir de la première zone est plutôt celui qui correspond au module réel du matériau [14]. En ce qui concerne cette étude, le module de Young est déterminé à partir de la première zone linéaire des courbes, et vaut 17,8 GPa. Les résultats trouvés en traction sont résumés dans le tableau 2.

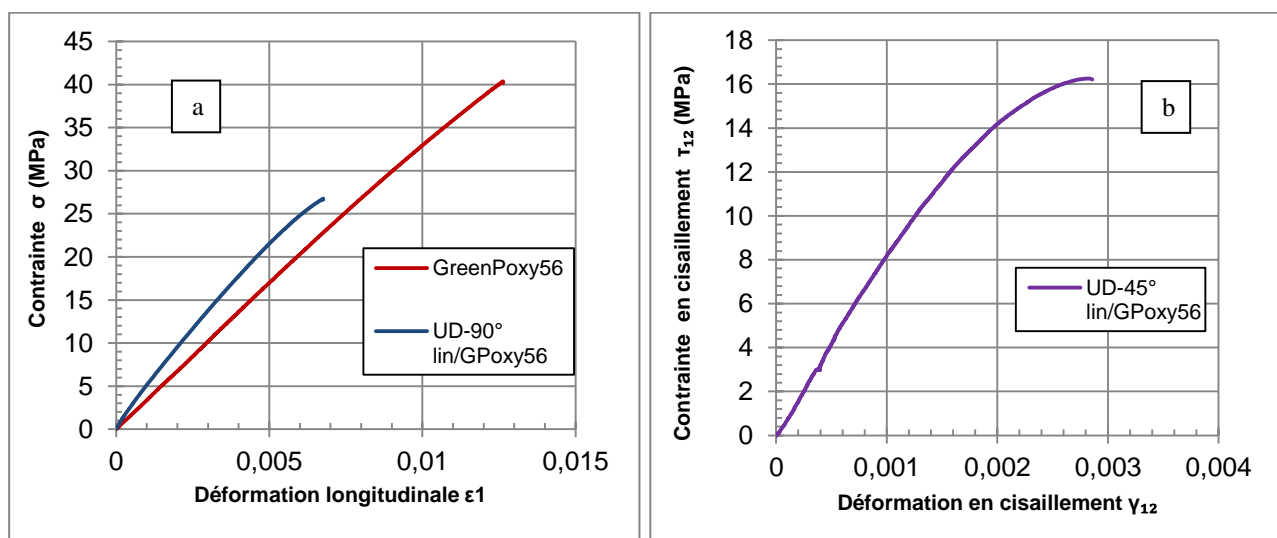


Figure 1. Comportement en traction de la résine GreenPoxy56 et des composites lin/GPoxy56 dans la direction 90°(a) et la direction 45° (b)

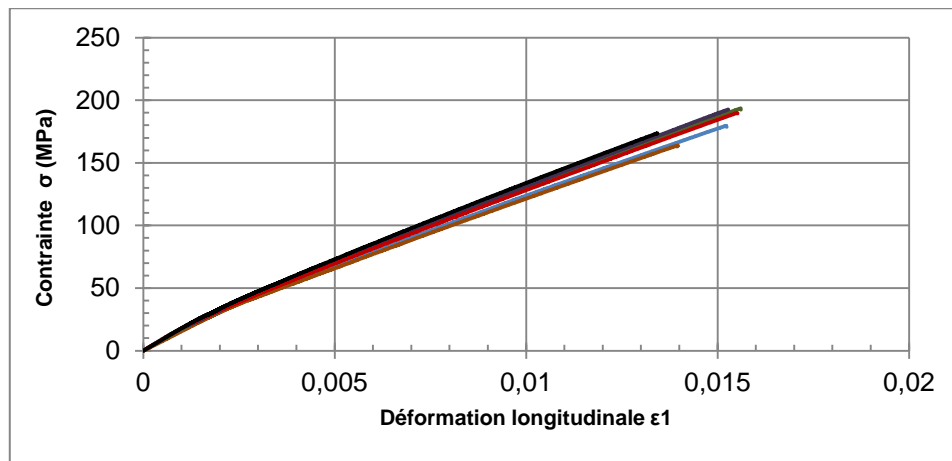


Figure 2. Comportement en traction du composite lin/GPox56 dans la direction 0°

Type des éprouvettes	Vf %	E (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\epsilon_r$ %
GreenPox56	-	3580±212	35±4	1,1±0,2
lin/Gpox56 UD-90°	29	4242±245	25±1	0,8±0,1
lin/Gpox56 UD-0°	29	17807±1476	179±14	1,4±0,1

Tableau 2. Les propriétés élastiques et à la rupture de la résine et des composites lin/GreenPox56 à 0° et 90°

## 2. Comportement en compression des anas de lin et des âmes

L'analyse de la courbe contrainte-déformation en compression des anas de lin en vrac non broyés présentée en figure 3a, montre leur grande compressibilité : Une pression de l'ordre de 1,1 MPa entraîne une déformation de l'ordre de 50% du volume initial. On constate également une rigidification progressive de l'échantillon traduite par une élévation régulière de l'inclinaison de la courbe.

L'analyse de la courbe contrainte-déformation des panneaux agglomérés par thermocompression présentée en figure 3b, met en évidence trois zones :

- une zone linéaire de module de compression si faible que les contraintes sont proches à zéro.
- après un taux de déformation d'environ 2,5% relativement important par rapport au faible taux de contrainte, la courbe atteint sa limite élastique. Le volume d'air entre les couches diminue et le contact entre particules-particules augmente.
- une évolution quasi-linéaire avec une élévation importante du module de compression d'environ 120 MPa. A ce stade, la compression est exercée directement sur chacune des particules. Il s'ensuit une diminution du volume de lumen. L'élévation davantage de la contrainte de compression provoque la disparition de lumen, et la compression est appliquée directement sur les composantes de paroi cellulaire.

Les allures des courbes d'anas seuls et des panneaux agglomérés par thermocompression sont presque identiques. La différence est principalement au niveau du taux de déformation du volume total : Une pression de 1,1 MPa n'entraîne qu'une déformation de l'ordre de 3% du volume initial du panneau (contre 50% pour les anas seuls). Cette différence de déformation est due à la modification de la structure des anas de lin au moment de la fabrication par thermocompression, et indépendamment de la résine ajoutée aux anas de lin. En effet, lors de la descente du plateau supérieur du moule, le volume du mélange anas et résine diminue. Arrivant à sa position finale, qui correspond à l'épaisseur de panneau voulue, une compression non-uniforme s'exerce sur les différentes couches de l'ébauche, causée par le déclenchement du chauffage et les changements

de la teneur en humidité résultants dans les couches supérieures. A ce stade, il n'y a pas de changement significatif dans les couches du centre, les particules glissent les unes sur les autres. En revanche, les couches supérieures de l'ébauche commencent à se densifier [16-17]. Après une dizaine de secondes, la pression exercée sur l'ébauche diminue jusqu'à s'annuler. Au fur et à mesure, la température de chauffage augmente de quelques degrés au-dessus de 90°C. Ceci entraîne d'une part la relaxation des couches supérieures de l'ébauche, et d'autre part la migration de vapeur d'eau du centre vers la couche extérieure de l'ébauche et la densification des couches du centre. Le lancement du refroidissement directement après le chauffage, gêne le retour élastique de toute la structure et accélère la polymérisation de la résine, d'où l'obtention des panneaux agglomérés denses.

La courbe contrainte-déformation des panneaux agglomérés par moulage présentée en figure 4, met en évidence un comportement plutôt analogue à celui des mousses et qui se manifeste par la présence de trois stades [18] :

- une zone élastique linéaire, donnant le module de compression, qui évolue jusqu'à une valeur seuil correspondante à la contrainte à la rupture.
- une stabilisation de la contrainte, pendant un certain intervalle de déformation, dont la valeur moyenne correspondait à une contrainte plateau. Durant ces deux stades, le bloc testé s'écrase progressivement, la porosité des anas diminue et la masse volumique augmente.
- une rigidification de l'échantillon traduite par l'augmentation régulière de la pente connue dans les mousses comme la densification. Les anas de lin tendent à se réarranger en s'imbriquant et s'empilant les uns sur les autres. Puis le frottement induit que les anas se bloquent, d'où le raidissement global de la structure.

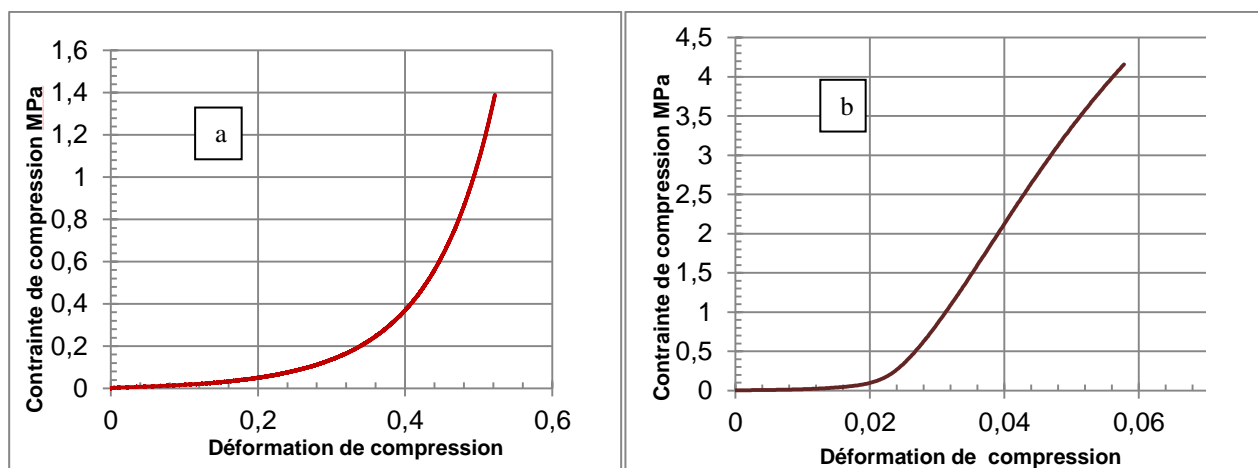


Figure 3. Comportement en compression des anas seules (a) et des panneaux agglomérés par thermocompression (b)

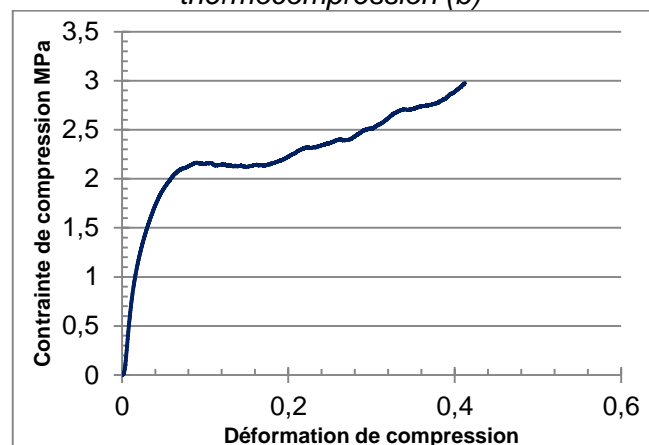


Figure 4. Comportement en compression des panneaux agglomérés par moulage

### 3. Approche structure sandwich

L'optimisation de la conception des structures sandwich requiert l'optimisation de ses constituants : les peaux et l'âme. Pour cela, les travaux présentés dans cette étude sont consacrés à l'amélioration des procédés d'obtention que ce soit des peaux composites et des âmes et à les caractériser mécaniquement. En effet, Les peaux doivent être suffisamment rigides pour bien reprendre les efforts de flexion, tandis que l'âme doit supporter les efforts de compression transverse et de cisaillement. Ce travail expérimental servira à une approche analytique dédiée à une optimisation globale des sandwichs.

### 4. Conclusion

Les travaux présentés dans cet article s'inscrivent dans le cadre de l'optimisation de la conception des structures sandwich à base de résine thermodurcissable partiellement bio-sourcée, renforcée des fibres de lin unidirectionnelles pour les peaux et des anas de lin, matériau non valorisé dans l'industrie mécanique, pour l'âme. L'optimisation d'une telle structure passe d'abord par l'optimisation de ses constituants : les peaux et l'âme, qui doivent répondre à des propriétés mécaniques adaptées, selon les applications. Le travail de cet article est divisé en deux parties. La première partie est consacrée à l'optimisation des procédés d'obtention d'une part des peaux en composite par infusion ; d'autre part des panneaux agglomérés pour l'âme par moulage et par thermocompression. Le but de cette optimisation est la fabrication de peaux composite avec un faible taux de porosité et des panneaux à particules bien consolidées ayant le minimum de masse. La deuxième partie de ce travail est dédiée à la caractérisation de ces constituants. L'originalité de cette partie réside dans la caractérisation mécanique d'un nouveau matériau, les anas de lin. Les essais de traction sur les peaux en lin ont montré une reproductibilité des résultats au niveau de la zone élastique, avec une légère variabilité des propriétés à la rupture. Négligeant l'hétérogénéité des fibres naturelles, des essais de tensiométrie accompagnés d'observations microscopiques sont en cours afin d'étudier les raisons de cette dispersion. Deux procédés de mise en œuvre, le moulage et la thermocompression ont été développés. Les essais de compression ont montré d'une part un comportement des panneaux agglomérés par moulage similaire à celui des mousses, mais différent à celui des panneaux agglomérés par thermo-compression. Cette différence est expliquée par la modification de la structure des anas de lin pendant la fabrication par le procédé de thermocompression. D'autre part, les essais de compression ont montré la grande compressibilité des anas de lin en vrac, un avantage pour dissiper l'énergie mécanique. D'autres essais mécaniques tels que la flexion 3-points, la traction et le cisaillement sont envisagés pour les panneaux agglomérés avant le passage à la fabrication des structures sandwich.

### Remerciements

Le projet est cofinancé par l'Union européenne avec le Fonds européen de développement régional (FEDER) et par le Conseil régional de Haute-Normandie.

### 5. Bibliographie

- [1] Industrie Française des matériaux composites. *Des enjeux prioritaires pour un développement durable*. DIGITIP Décembre 2001.
- [2] Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie. *Feuille de route R&D de la filière chimie du végétal*. Avril 2011.
- [3] Fibres Recherche Développement®. *Évaluation de la disponibilité et de l'accessibilité de fibres végétales à usage matériaux en France*. ADEME.

- [4] Commissariat général au développement durable. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer. *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*. Mars 2010.
- [5] DUIGOU Antoine Le, DAVIES Peter, BALEY Christophe. *Replacement of Glass/Unsaturated Polyester Composites by Flax/PLLA Biocomposites : Is it Justified ?* Journal of Biobased Materials and Bioenergy, vol 5, pp 466-482, 2011.
- [6] BODROS Edwin, PILLIN Isabelle, MONTRELAY Nicolas, BALEY Christophe. *Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications?* Composites Science and Technology, vol 67, pp 462-470, 2007.
- [7] Journal officiel de la république française. *Les filières lin et chanvre au cœur des enjeux des matériaux biosourcés émergents*. Novembre 2015.
- [8] MOHABEER Cetna, ABDELOUAHED Lokmane, MARCOTTE Stéphane, TAOUK Bechara. *Comparative analysis of pyrolytic liquid products of beech wood, flax shives and woody biomass components*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol 127, pp 269-277, 2017.
- [9] DUBOIS Vincent, LEBLANC A, CARPENTIER O, ALHAIK G, WIRQUIN E. *Performances of flax shive-based lightweight composites with rapid hardening*. Construction and Building Materials, vol 165, pp 17-27, 2018.
- [10] BERGES Michael, LEGER Romain, PLACET Vincent, PERSON Véronique, CORN Stéphane, GABRION Xavier, ROUSSEAU Jérôme, RAMASSO Emmanuel, LENNY Patrick, FONTAINE Stéphane. *Influence of moisture uptake on the elastic, cyclic and dynamic behaviour of unidirectional flax fibre-reinforced epoxy laminates*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol 88, pp 165-177, 2016.
- [11] SELLAK Radouane. *Elaboration et caractérisation d'une résine thermodurcissable conductrice*. Thèse de l'Université du Maine, 2013.
- [12] ACERA FERNANDEZ. J, LEMOIGNE. N, CARO-BRETELLE. A.S, ELHAGE. H, LEDUC.A, LOZACHMEUR.M, BONO.P, BERGERET. A, *Role of flax cell wall components on the microstructure and transverse mechanical behavior of flax fabrics reinforced epoxy biocomposites*. Industrial Corps and Products, vol 85, pp 93-108, 2016.
- [13] ESSID Safa, MONTI Arthur, TRUONG HOANG Thuy-Quynh, JENDLI Zouhaier, ELMAHI Abderrahim. *Analyse comparative du comportement mécanique et vibratoire de composites organiques en résine Elixir renforcée de fibres de lin et de verre*, 20<sup>èmes</sup> Journées Nationales sur les Composites, 2017.
- [14] POILANE. C, CHERIF. Z.E, RICHARD.F, VIVET.A, BEN DOUDOU. B, CHEN.J. *Polymer reinforced by flax fibres as a viscoelastoplastic material*. Composites Structures, vol 112, pp 100-112, 2014.
- [15] BALEY Christophe. *Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol 33, pp 939-948, 2002.
- [16] YOUNG Timothy, WINISTORFERF Paul Moschler, WANG Siqun . *Fundamentals of vertical density profile formation in wood composites. Part III. MDF Density formation during hot-pressing*. Wood and Fiber Science, vol 36, pp 17-25, 2004.
- [17] BASTIAS Marcia Vidal. *Modélisation du pressage à chaud des panneaux de fibres de bois (MDF) par la méthode des éléments finis*. Thèse de l'Université Laval Québec, 2006.
- [18] DUARTE Isabelle, VESENJAK Matej, KRSTULOVIC-OPARA Lovre, REN Zoran. *Crush performance of multifunctional hybrid foams based on an aluminium alloy open-cell foam skeleton*. Polymer Testing, vol 67, pp 246-256, 2018.