

UNIVERSITE DU QUEBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ A  
L'UNIVERSITE DU QUEBEC A TROIS-RIVIERES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAITRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE

PAR  
SELMI SABER

TITRE DU MÉMOIRE  
ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES COMPOSITES SANDWICHES EN  
FIBRES NATURELLES

2019

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## Dédicace

*Je dédie ce mémoire*

*À mon père, à l'âme de ma mère*

*À ma femme et à « Khalti » Zakia*

*À mes superviseurs*

*À toute ma famille*

## **Remerciements**

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et ma profonde gratitude à tous ceux qui m'ont donné la possibilité pour accomplir ce mémoire de près ou de loin.

Je voudrais tout d'abord exprimer ma profonde reconnaissance à mon Directeur de recherche, M. Luc Laperrière, Professeur à l'Université du Québec à Trois-Rivières, mon codirecteur M. Soussou Kelouwani, Professeur à l'Université du Québec à Trois-Rivières et M. Mohamed Habibi, Professeur associé à l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour m'avoir accueilli dans leur groupe de recherche et de m'avoir proposé ce sujet passionnant sur l'étude du comportement mécanique des composites sandwichs à fibres naturelles. Leurs compétences scientifiques, notamment expérimentales, et leurs idées pertinentes ont permis de mener à bien ce projet. Je tiens particulièrement à les remercier pour la grande liberté qu'ils m'ont laissée et pour leurs sens de relation humaine.

J'exprime également mes sincères remerciements aux Professeurs de l'Université du Québec à Trois-Rivières, qui m'ont fait l'honneur de participer à la correction de mon mémoire.

J'adresse mes remerciements particuliers à M. Dany Lemay, technicien du département de génie mécanique, pour avoir mis à ma disposition son temps et le matériel du laboratoire pour la préparation des échantillons.

Je tiens à remercier également les Professeurs du département de génie mécanique qui ont contribué de manière significative à la réussite de mon parcours universitaire.

## Résumé

Récemment, les structures composites légères ont été largement utilisées dans diverses applications industrielles telles que l'industrie du transport, où le contrôle de l'économie de poids est le plus grand. Les structures de composites sandwich en nid d'abeilles sont caractérisées par un rapport de résistance/poids élevé, ainsi que par des caractéristiques de rigidité et de résistance à la flexion spécifiques élevées.

Les panneaux en sandwich sont composés par deux feuilles (peaux) séparées par un noyau léger (âme). La performance d'un sandwich dépend des propriétés des matériaux des constituants, des paramètres géométriques, des caractéristiques de liaison entre chaque peau et le noyau, ainsi que l'état fonctionnel.

Cette étude définit un nouveau composite sandwich à base des fibres naturelles dont les peaux et l'âme sont tous les deux à la base d'un composite renforcé, constitué par des fibres courtes de lin non tissées liées dans une matrice de résine époxy. L'étude a pour but de décrire en première étape les procédés de fabrication des composites sandwichs, d'étudier leurs caractéristiques mécaniques expérimentales et d'établir leurs modes de défaillance en utilisant l'émission acoustique. Les résultats obtenus sont optimisés à l'aide d'un programme Matlab utilisant un réseau de neurones (RDN) et un algorithme génétique (AG).

En partant de trois densités de base avec un diamètre et une épaisseur de cellule constants de l'âme, et de trois épaisseurs différentes des peaux, on a élaboré notre plan d'expérience. Les peaux ont toutes une même fraction volumique de 40%. L'assemblage du noyau en nid d'abeille avec les peaux constitue le composite d'intérêt. Une couche d'adhésifs 3M est placée entre les peaux et le noyau, le tout est serré dans un étou pendant 4 heures.

La caractérisation expérimentale du noyau est basée sur la réponse sous compression à plat, alors que la caractérisation expérimentale du sandwich est basée sur des tests de flexion à trois points. Les normes ASTM C365 et ASTM C393 ont été utilisées pour effectuer ces tests sur une machine MTS avec un outillage approprié pour chaque type d'essai.

Les fils Tex 5000 ont été coupés en fibres courtes de 5 mm (l'utilisation de 5 mm de longueur de fibre est liée à une limitation d'équipement) puis formée en mats non-tissés d'une densité de surface de 100 g / m<sup>2</sup>, 150 g / m<sup>2</sup> et 200 g / m<sup>2</sup> pour les noyaux, et des épaisseurs de 2, 3 et 4 couches de fibres pour les peaux.

Des capteurs d'Émission Acoustique (ÉA) ont été installés sur les échantillons pendant les tests de compression et flexion pour déterminer les différents modes d'endommagement dans le matériau composite.

L'augmentation de la densité surfacique des noyaux a entraîné une augmentation des propriétés mécaniques en compression. L'analyse par ÉA a démontré que le taux de fissuration matricielle et l'arrachement de la fibre sont beaucoup plus importants que la rupture de fibre pour l'essai de compression.

Lors du test de flexion, on a noté que l'augmentation de la densité de l'âme n'a pas un effet très important sur la charge maximale que le sandwich peut supporter. Par contre l'augmentation de l'épaisseur des peaux a un effet prédominant dans l'essai de flexion à cause d'un plus grand support de la charge avant de la transmettre à l'âme.

Les résultats d'endommagement en flexion sont différents de ceux en compression, ce qui supporte l'objectif de mieux comprendre les divers mécanismes de chaque mode de chargement. L'essai de flexion à trois points a aussi démontré l'importance de chaque constituant du sandwich ainsi que son influence sur les propriétés mécaniques du matériau testé.

Finalement, les résultats obtenus des essais de caractérisation mécanique ont été utilisés par la suite pour les optimiser avec un programme sur Matlab. Le programme a pour rôle de déterminer les variables d'entrées (épaisseur de la peau et densité de l'âme) qui répondent le mieux aux consignes introduites par l'utilisateur.

## Table des matières

<i>Dédicace</i> .....	<i>i</i>
<i>Remerciements</i> .....	<i>ii</i>
<i>Résumé</i> .....	<i>iii</i>
<i>Table des matières</i> .....	<i>vi</i>
<i>Liste des tableaux</i> .....	<i>ix</i>
<i>Liste des figures</i> .....	<i>x</i>
<i>Liste des équations</i> .....	<i>xiii</i>
<i>Chapitre 1 - Introduction</i> .....	<i>1</i>
1.1    Introduction .....	<i>1</i>
1.2    Problématique.....	<i>5</i>
1.3    Questions de recherche .....	<i>5</i>
1.4    Objectifs.....	<i>5</i>
1.5    Les mots clés.....	<i>6</i>
<i>Chapitre 2 - Revue de la littérature</i> .....	<i>7</i>
2.1    Les matériaux composites .....	<i>7</i>
2.2    Les composites à fibres naturelles.....	<i>8</i>
2.3    Les composites à fibres de lin .....	<i>14</i>

<b>2.4 Structure des composites.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5 Les résines .....</b>	<b>19</b>
<b>2.6 Les composites sandwichs.....</b>	<b>20</b>
<i>Chapitre 3 - Méthodologie.....</i>	<i>24</i>
<b>3.1 Fabrication .....</b>	<b>24</b>
3.1.1 Fabrication des couches en fibres courtes .....	24
3.1.2 Moulage des peaux .....	26
3.1.3 Moulage des nids d'abeille .....	28
3.1.4 Assemblage des sandwichs.....	30
<b>3.2 Caractérisation .....</b>	<b>32</b>
3.2.1 Essais de compression .....	32
3.2.2 Essais de flexion 3 points .....	33
<b>3.3 Émission acoustique .....</b>	<b>36</b>
<b>3.4 Optimisation.....</b>	<b>37</b>
<i>Chapitre 4 - Résultats et discussion .....</i>	<i>39</i>
<b>4.1 Essai de compression .....</b>	<b>39</b>
4.1.1 Caractérisation mécanique.....	39
4.1.2 Emission acoustique .....	42
4.1.2.1 Energie cumulée .....	42

4.1.2.2 Classification des évènements acoustiques et des modes d'endommagement .....	44
4.1.2.3 Contribution de chaque mode d'endommagement .....	48
<b>4.2 Essai de flexion.....</b>	<b>49</b>
4.2.1 Caractérisation mécanique.....	49
4.2.2 Émission acoustique .....	53
4.2.2.1 Énergie cumulative .....	53
4.2.2.2 Classification des évènements acoustiques et des modes d'endommagement .....	56
4.2.2.3 Contribution des modes d'endommagement .....	60
<b>4.3 Exemple d'utilisation du logiciel d'optimisation .....</b>	<b>61</b>
<i>Chapitre 5 - Conclusions.....</i>	<i>64</i>
<b>5.1 Résultats importants en égard des objectifs.....</b>	<b>64</b>
5.1.1 Procédé de fabrication et assemblage des âmes et des peaux.....	64
5.1.2 Résultats importants sur la compression des noyaux .....	65
5.1.3 Résultats importants sur la flexion 3 points des sandwichs.....	65
<b>5.2 Travaux futurs .....</b>	<b>66</b>

## Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Les composants fabriqués en fibres naturelles selon les constructeurs automobiles[35] .....	11
Tableau 2.2 : Composition et propriétés des quelques fibres végétales[28] .....	14
Tableau 2.3: Résultats de la littérature pour les propriétés de traction des composites en fibres de lin et en fibres de verre.....	18
Tableau 3.1 : Les combinaisons possibles pour l'essai de flexion à trois points .....	34
Tableau 4.1 : Tableau des propriétés des nids d'abeille pour l'essai de compression .....	39
Tableau 4.2: Résultats de la littérature sur la classification des modes d'endommagement selon les amplitudes des évènements acoustiques.....	45
Tableau 4.3: Résultats de l'analyse multi-variable utilisée dans cette étude.....	45
Tableau 4.4 : Les propriétés mécaniques des composites sandwichs en flexion .....	53
Tableau 4.5: Quelques résultats de simulation pour le programme d'optimisation.....	62

## Liste des figures

Figure 2.1 : Classification des fibres naturelles selon leur origine (adapté)[28].....	9
Figure 2.2: Evolution de l'utilisation des fibres naturelles [31] .....	10
Figure 2.3: Propriétés spécifiques des fibres naturelles et des fibres synthétiques[38].....	13
Figure 2.4: Influence du type de la matrice et du procédées de fabrications sur les propriétés du composites[38] .....	16
Figure 2.5: Schéma d'un composite sandwich.....	20
Figure 2.6: Courbe de compression des différentes âmes : nid d'abeille en aluminium, grille en aluminium et la combinaison du nid d'abeille et grille [65].....	22
Figure 2.7: Comparaison de la contrainte entre les sandwichs à fibres de jute de 6mm et 10 mm avec d'autres en aluminium et Nomex [66]. .....	23
Figure 3.1: Formette dynamique .....	25
Figure 3.2: a- Presse ; b- Séchoir; c- Couche de fibre courtes .....	25
Figure 3.3: a- Découpage ; b-Pesage; c-Préparation du moule; d- moulage à la main.....	27
Figure 3.4: Plaque de composite de fibres courtes .....	28
Figure 3.5: Moule de fabrication de nid d'abeille, a) vue assemblée, b) vue éclatée, c) vue schématique, d) nids d'abeille.....	29
Figure 3.6: Schéma explicatif d'un panneau sandwich.....	30
Figure 3.7: a) peau à fibres courtes, b) scotch 3M, c) collage de l'adhésif sur la peau, d) sandwich en nid d'abeille à fibres courtes .....	31
Figure 3.8: a) Essai de compression, b) Échantillon pour l'essai de compression.....	32
Figure 3.9: Installation des capteurs d'émission acoustique sur la pièce en compression .....	33
Figure 3.10: Essai de flexion à trois points .....	35

Figure 3.11: Installation des capteurs d'émission acoustique sur la pièce en flexion .....	35
Figure 3.12: Fabrication et modélisation mécanique en compression et flexion .....	36
Figure 3.13: Optimisation par réseau de neurones (RDN) et algorithme génétique (AG).....	38
Figure 4.1: Courbes de compression des noyaux avec différentes densités .....	41
Figure 4.2: A) Module d'Young et B) Contrainte, en fonction de la densité surfacique des noyaux.....	42
Figure 4.3: Courbe de la force en compression et énergie cumulative AE pour les trois densités testées .....	44
Figure 4.4: amplitude d'évènements et énergie acoustique cumulative de l'essai de compression : A-B) NA100; C-D) NA150 et E-F) NA200.....	47
Figure 4.5: Indice de contribution pour chaque mode d'endommagement pour les différents échantillons de noyau soumis à la compression.....	49
Figure 4.6 : Schéma de l'essai de flexion .....	50
Figure 4.7 : Courbe de flexion des sandwichs NA100 avec différentes épaisseurs de peaux .....	51
Figure 4.8 : Courbe de flexion des sandwichs NA150 avec différentes épaisseurs de peaux .....	52
Figure 4.9 : Courbe de flexion des sandwichs NA200 avec différentes épaisseurs de peaux .....	52
Figure 4.10 : Courbe de la force en flexion et énergie cumulative du NA100 pour les trois épaisseurs testées.....	54
Figure 4.11 : Courbe de la force en flexion et énergie cumulative du NA150 pour les trois épaisseurs testées.....	55
Figure 4.12 : Courbe de la force en flexion et énergie cumulative du NA200 pour les trois épaisseurs testées.....	56
Figure 4.13 : amplitude des évènements et énergie acoustique cumulative de l'essai de flexion : A-B) NA100x2; C-D) NA100x3 et E-F) NA100x4.....	57

Figure 4.14 : amplitude des évènements et énergie acoustique cumulative de l'essai de flexion : A-B) NA150x2; C-D) NA150x3 et E-F) NA150x4.....	58
Figure 4.15: amplitude des évènements et énergie accoustique cumulative de l'essai de flexion : A-B) NA200x2; C-D) NA200x3 et E-F) NA200x4.....	59
Figure 4.16 : Indice de contribution pour chaque mode d'endommagement pour les différents échantillons testés en flexion .....	61

## **Liste des équations**

Equation 3.1.....	26
Equation 3.2.....	37
Equation 4.1.....	48
Equation 4.2.....	62

# **Chapitre 1 - Introduction**

## **1.1 Introduction**

Actuellement, les composites renforcés par des fibres naturelles se développent très rapidement et occupent une place très importante dans diverses applications d'ingénierie (domaine automobile, domaine de loisir, ...). La mise en forme de composites à base de fibres et résines naturelles remplace déjà plusieurs applications de composites traditionnels à base de fibre de verre et de polymères.

Ainsi, les composites renforcés par les fibres naturelles sont connus par leurs propriétés uniques. Le lin, la jute, le sisal, le chanvre, le kenaf, le coco et beaucoup d'autres fibres naturelles sont respectueuses de l'environnement. Elles possèdent une résistance et un module spécifiques relativement élevés en raison de leur faible densité. Elles sont renouvelables, recyclables et biodégradables. Du point de vue de leur fabrication, ces fibres sont peu coûteuses, non abrasives pour les équipements de traitement, sans irritation et présentent moins de risques pour la santé. La consommation d'énergie est plus faible, pour

les fibres naturelles en comparaison avec celles synthétiques, pour la préparation des fibres et le moulage du composite [1-5].

Un intérêt particulier est accordé aux fibres de lin et de nombreux chercheurs ont étudié et abordé leur compétitivité et leur adéquation pour le renforcement de la matrice polymère [3, 6, 7]. Dans l'application de l'ingénierie structurale, les fibres de lin sont une alternative favorable aux fibres de verre. Elles sont reconnues comme l'une des meilleures fibres naturelles en raison de leur potentiel pour combiner des propriétés spécifiques élevées et à faible coût.

Récemment, les structures composites légères ont été largement utilisées dans diverses applications industrielles telles que l'industrie du transport, où le contrôle de l'économie de poids est le plus grand [8]. Plus particulièrement, les structures sandwich en nid d'abeilles sont caractérisées par un rapport résistance/poids élevé, ainsi que par des caractéristiques de rigidité et de résistance à la flexion spécifiques élevées. Les panneaux en sandwich sont composés de deux feuilles externes (peau) séparées par un noyau léger (âme) [9]. La performance d'un sandwich dépend des propriétés des matériaux constituants (propriétés du matériau de la peau et du noyau), des paramètres géométriques (épaisseur des couches individuelles et de l'âme, géométrie du panneau, dimension de la cellule de noyau, etc.), des caractéristiques de liaison entre la peau et le noyau (type d'adhésif utilisé pour lier les peaux avec le noyau, structure du matériau du noyau qui affecte la zone de liaison entre la peau et le noyau) et de l'état fonctionnel (type de charge, conditions environnementales, etc. ) [10].

Les noyaux en nid d'abeilles classiques sont principalement basés sur du matériel métallique (comme le nid d'abeille en aluminium) [11], du Nomex (papier) [12, 13] et du plastique (comme le coton en polypropylène). L'utilisation du plastique offre de nombreux avantages tels que la densité réduite par rapport à la haute densité du matériau métallique, la recyclabilité et la dissipation d'énergie en termes d'amortissement. Cependant, la résistance et la rigidité de ces noyaux sont limitées en raison des faibles propriétés des matériaux plastiques. Compte tenu du fait que le choix des peaux, qui est important du point de vue des propriétés de l'ensemble du sandwich, repose principalement sur les propriétés du matériau (propriétés mécaniques, épaisseur, orientation des fibres, fraction de volume des fibres, etc.), une amélioration des propriétés de noyau peut être avantageuse pour améliorer la performance souhaitée. Par conséquent, en vue d'améliorer la résistance et la rigidité des matériaux de noyau en plastique, les fibres naturelles sont utilisées comme renforts dans les parois cellulaires des noyaux [14, 15].

Ce travail présente un nouveau composite sandwich dont le noyau en nid d'abeille et les peaux sont tous les deux constitués de composite de fibres naturelles. Le composite utilisé consiste de fibres courtes de lin non tissées (mats) dans une matrice époxy. Les peaux ont été fabriquées à fraction massique constante de 40%, mais avec des épaisseurs différentes. Pour leur part, les noyaux ont une épaisseur constante avec une densité surfacique variable de  $100 \text{ g/m}^2$ ,  $150 \text{ g/m}^2$  et  $200 \text{ g/m}^2$ . L'assemblage de ces combinaisons de divers noyaux et peaux constitue le sandwich d'intérêt qui sera caractérisé dans cette recherche.

La caractérisation expérimentale du noyau est basée sur la réponse sous compression à plat et celle du sandwich sur des tests de flexion à trois points. Ces caractérisations permettent une modélisation à l'aide du logiciel Matlab de la réponse du sandwich sous charge dans le but d'optimiser le matériau. L'Émission Acoustique (ÉA) est aussi utilisée en parallèle avec l'essai de caractérisation pour mieux interpréter les résultats obtenus.

L'application de l'ÉA sur les matériaux composites en nid d'abeille est devenue nécessaire pour tester les performances en termes de compression et de dégradation. C'est une source d'ondes de propagation élastiques générées par la libération rapide d'énergie lors de l'initiation ou la propagation d'un mode de dommage. Ces ondes sont en fait le résultat de contraintes transitoires libérées par les modifications structurelles irréversibles du matériau. Les techniques basées sur l'ÉA permettent une surveillance en service sur une vaste zone avec une instrumentation minimale. Cela donne une bonne idée sur les modes de dommage et leur initiation/croissance. Dans cette technique, des capteurs enregistrent le mouvement des ondes élastiques qui suivent les événements d'initiation/propagation de différents modes d'endommagement des matériaux tout en les transformant en ondes électriques. Cette technique a la capacité de surveiller globalement la structure et elle donne une idée claire de la manière de traiter ces modes de dommage, de les éliminer ou de les minimiser pour améliorer le mode de fonctionnement du matériau utilisé [16-18].

## **1.2 Problématique**

Plusieurs domaines de l'industrie s'intéressent aux composites à fibres naturelles pour la production d'éléments structuraux, en lieu et place des composites synthétiques non dégradables dérivés du pétrole. Les matériaux composites sandwichs disposent d'avantages importants par rapport aux matériaux traditionnels: légèreté, résistance mécanique, maintenance réduite, isolation thermique et sonore. Ces matériaux ne sont pas encore très utilisés dans les différents domaines par manque d'information sur leurs caractéristiques mécaniques. Il devient donc difficile de les optimiser pour une application donnée.

## **1.3 Questions de recherche**

De cette problématique on peut tirer deux questions de recherche qui sont :

- a- Comment les paramètres géométriques et physiques des peaux et des âmes d'un composite sandwich à fibres naturelles influencent son comportement mécanique?
- b- Comment optimiser un composite sandwich à fibres naturelles pour une application donnée?

## **1.4 Objectifs**

Des questions de recherche, on peut tirer deux objectifs pour cette recherche :

- I. Mieux comprendre le comportement mécanique en compression et en flexion des composites nids d'abeilles dont l'âme est également en fibres naturelles de lin, en tenant compte de divers paramètres des âmes et des peaux.
- II. Optimiser les paramètres d'un composite nid d'abeille en fibres naturelles de lin afin d'améliorer ses performances pour une application donnée

### 1.5 Les mots clés

On peut citer les mots clés de ce travail de recherche : composites, composites sandwichs, nids d'abeille, composites à fibres naturelles (CFN), lin, fibres courtes, thermodurcissables, moulage par compression, caractérisation mécanique, compression, flexion, émission acoustique.

Ils ont servi au chapitre suivant pour décortiquer la problématique de ce mémoire.

## **Chapitre 2 - Revue de la littérature**

### **2.1 Les matériaux composites**

Un matériau composite est constitué de deux ou plusieurs matériaux. Les propriétés et les performances des matériaux réunis sont meilleures que les performances des constituantes individuelles. [19-22]. Il s'agit souvent d'un renfort (fibre), qui est la phase la plus rigide et la plus résistante, dite (phase discontinue), baignant dans une deuxième phase appelée matrice (phase continue). Cette dernière a pour rôle de transférer les charges extérieures du composite entre les fibres et de protéger ces dernières. Face à la grande évolution des matériaux composites dans les différents secteurs dont chacun a ses exigences, d'autres phases supplémentaires peuvent s'ajouter par l'addition d'un produit chimique qui sert à améliorer les performances du composite (vieillissement, résistance au feu) ou comme agent de liaison entre les phases principales [23, 24].

Les propriétés des constituants, la géométrie et la répartition des phases ainsi que leurs fractions massiques sont des paramètres qui influencent les propriétés du matériau composite. Le choix du renfort et de la matrice est fonction des propriétés finales désirées en service, de la possibilité de les assembler, et de leurs coûts. Comparées avec les fibres longues où la charge est supportée principalement par les fibres, les fibres courtes sont le choix optimal pour des matériaux composites à faible ou à moyenne performance.

Bien que les propriétés du renfort soient supérieures à celles de la matrice, cette dernière est responsable de garder les fibres en position et de donner la forme finale du matériau à fabriquer.

On trouve les matériaux composites renforcés par des fibres synthétiques (aramide, carbone, verre) utilisés essentiellement dans les domaines de l'aéronautique, la construction, l'automobile. La fibre de verre est la plus utilisée vue ses propriétés mécaniques intéressantes ainsi que son faible coût en comparaison avec celui de la fibre de carbone[25].

Les fibres synthétiques présentent aussi quelques inconvénients : des coûts de production élevés, des dangers pour la santé ainsi que des effets négatifs sur l'environnement[26]. On cherche entre autre à remplacer les fibres synthétiques à base pétrochimique[27].

## 2.2 Les composites à fibres naturelles

Comme leur nom l'indique, les fibres naturelles sont des matériaux renouvelables et biodégradables. Selon leur origine, les fibres naturelles sont classées en trois familles[28-30] (figure 2.1):

- Les fibres végétales : coton, lin, chanvre, noix de coco, soie, ...
- Les fibres animales : toison animale, soie
- Les fibres minérales : basalte ; amiante

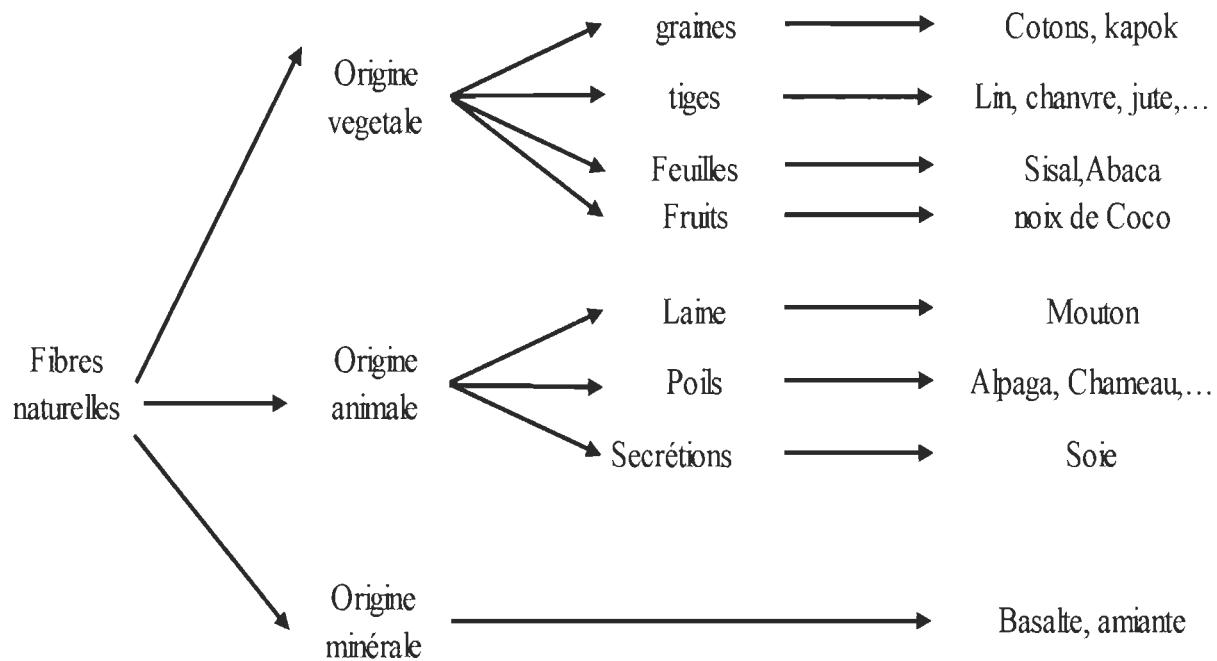


Figure 2.1 : Classification des fibres naturelles selon leur origine (adapté)[28]

Selon BCC Research, la production mondiale en fibres naturelles est de 2,4 millions de tonnes en 2011 et elle est de l'ordre de 4,6 millions de tonnes en 2016 (Figure 2.2).

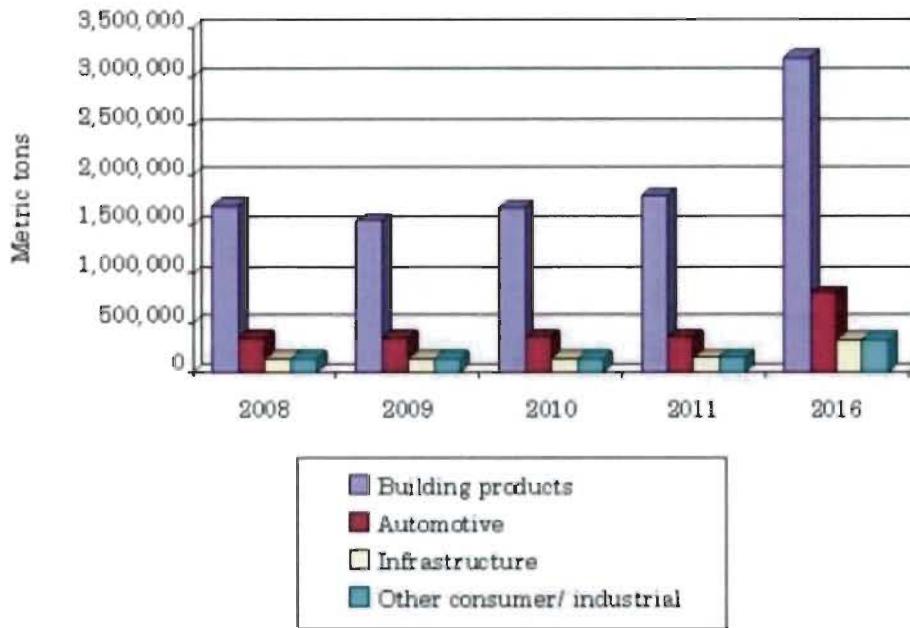


Figure 2.2: Evolution de l'utilisation des fibres naturelles [31]

A cause de leurs propriétés mécaniques élevées, les fibres végétales ou dites lignocellulosique sont les plus utilisées comme renforts des matériaux composites à fibres naturelles[28]. Elles remplacent la fibre synthétique de verre dans plusieurs composantes dans l'industrie automobiles [32] et dans le domaine du sport et loisirs (kayak, raquettes de tennis)[33, 34]. Le tableau 2.1 illustre un échantillon de pièces automobiles fabriquées à base de fibres naturelles selon divers constructeurs à travers le monde.

Tableau 2.1 : Les composants fabriqués en fibres naturelles selon les constructeurs automobiles[35]

<b>Modèle</b>	<b>Manufacturier</b>	<b>Composants</b>
A2, A3, A4, A6, A8, Roadster, Coupe,	Audi	Sièges arrières, panneaux de portes arrières et de cote, doublures de coffre, porte-chapeaux, doublures de roue de secours
C5	Citroën	Panneaux de portes intérieures
3,5,7 séries	BMW	Panneaux de portes, panneaux de garnitures de pavillon, doublures de coffre, sièges arrières, panneaux d'isolation acoustique, doublure de plancher
Eco Elise	Lotus	Panneaux de carrosserie, spoilers, sièges, tapis intérieurs
Punto, Brava, Marea, Alfa Romeo 146, 156	Fiat	Panneaux de portes
Astra, Vectra, Zafira	Opel	Panneaux instrumentaux, panneaux de garniture de pavillon, panneaux de portes, panneaux de couverture de piliers
406	Peugeot	Panneaux de portes avant et arrière
2000 et autres	Rover	Isolation, étagères arrières de rangement/ panneaux
Raum, Brevis, Harrier, Celsior	Toyota	Panneaux de portes, sièges arrière, tapis de sol, couvre-roue de secours
Golf 4, Passat variant, Bora	Volkswagen	Panneaux de portes, sièges arrières, panneau de finition de couvercle de coffre, doublures de coffre
Space Star, Colt	Mitsubishi	Planchers de coffre, panneaux de portes, panneaux instrumentaux
Mercedes A, C, E, S Class, trucks, EvoBus (exterior)	Daimler-Benz	Panneaux de portes, pare-brise/tableaux de bord, panneaux de couverture des piliers, boîte à gants, panneaux de supports instrumentaux, isolation, panneaux d'ouverture, panneaux de dossier des sièges, panneaux de coffre, surface de sièges/dossiers, couverture interne du moteur,

---

isolation du moteur, pare-soleils, pare-chocs, boîtes de roue, couverture de toit

Pilot	Honda	Planchers de coffre
C70, V70	Volvo	Rembourrages des sièges, panneaux de plancher de coffre
Cadillac deville, Chevrolet TrailBlazer	General Motors	Sièges arrière, planchers de coffre
L3000	Saturn	Panneaux de garniture de tablette arrière et panneaux de portes
Mondeo CD 162, Focus, Ford Freestar	Ford	Panneaux de plancher, panneaux de portes, B-piliers, doublures de coffre

Enfin le choix des industriels de changer les fibres synthétiques par d'autres fibres végétales se base essentiellement sur leurs propriétés mécaniques, le coût de la fibre et les frais de sa transformation, en tenant compte aussi de la stratégie de plusieurs pays vers l'économie verte : en utilisant des ressources renouvelables et biodégradables, on minimise les émissions des moyens de transport et pas de nécessité de traitement spécial du produit après sa fin de vie.

Une comparaison entre les fibres synthétiques et les fibres végétales a été réalisée en tenant compte de leurs caractéristiques économiques, techniques et écologiques. Les fibres

végétales sont caractérisées par une faible densité ( $1.30$  à  $1.55$  g.cm $^{-3}$ ), tout en maintenant une bonne résistance. Elles ont donc une bonne résistance spécifique [36, 37].

Ashby [38] a présenté les modules et les résistances spécifiques en traction de différentes fibres naturelles (lin, chanvre, jute) et synthétiques. La figure 2.3 montre bien que le module spécifique des fibres de lin est supérieur à celui des fibres de verre tout en admettant une résistance presque égale.

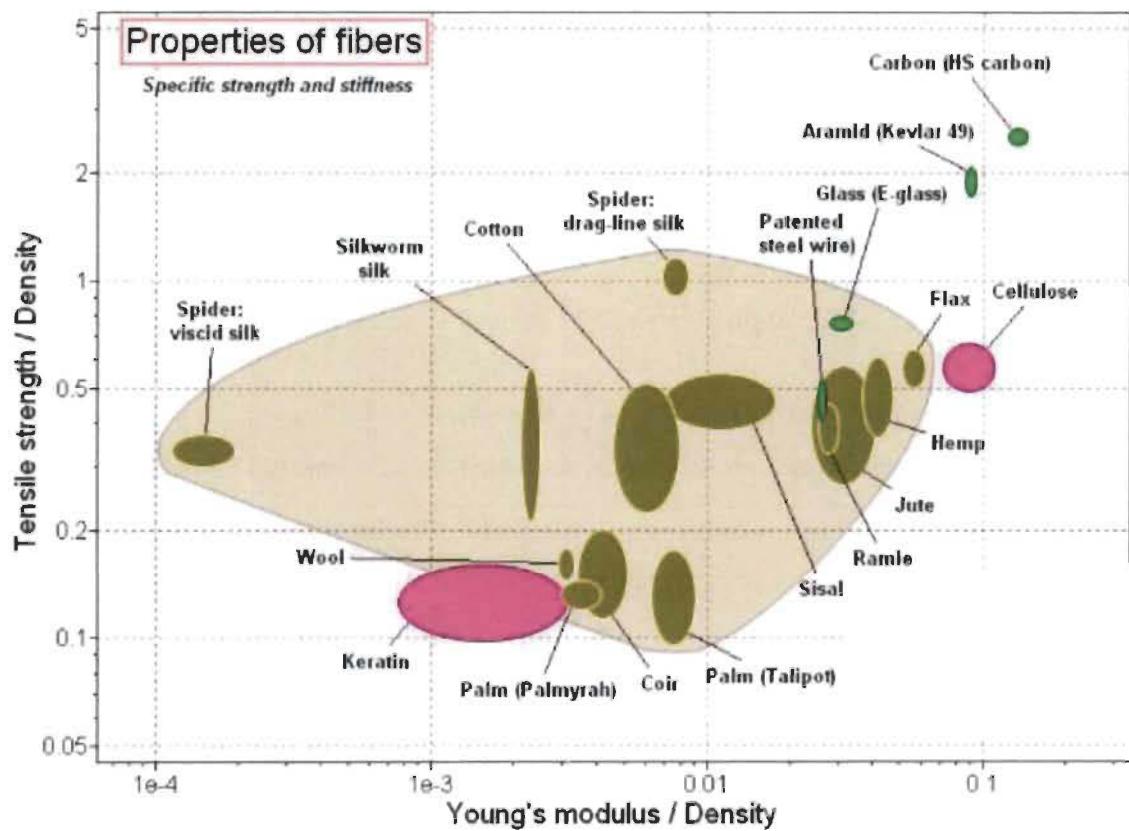


Figure 2.3: Propriétés spécifiques des fibres naturelles et des fibres synthétiques[38]

### 2.3 Les composites à fibres de lin

Le lin est une plante annuelle cultivée pour ses fibres ainsi que pour ses grains. La France est le premier producteur dans le monde de la fibre de lin sachant que le Canada est le premier producteur des grains issus de la plante de lin. L'Amérique du Nord et l'Europe représentent les premiers consommateurs de fibre dans le monde respectivement dans le domaine de la construction et de l'automobile.

Les fibres de lin sont extraites de la tige de la plante [28]. Ils ont une longueur qui peut varier de 4 mm à 77 mm et un diamètre de 5 à 76 µm. Pour avoir une fibre technique, il faut rassembler presque 40 fibres élémentaires[39]. Le tableau 2.2 représente les compositions et propriétés de quelques fibres végétales.

Tableau 2.2 : Composition et propriétés des quelques fibres végétales[28]

Fibres	Cellulose (%)	Angle micro fibrillaire (degrés)	Diamètre (µm)	Longueur (mm)	Rapport L/D
<b>Lin</b>	64-71	10	5-76	4-77	1687
<b>Ramie</b>	83	7,5	16-126	40-255	3500
<b>Chanvre</b>	78	6,2	10-51	5-55	960
<b>Jute</b>	61-71	82	25-200	-	110
<b>Sisal</b>	67-78	45	7-47	0,8-8	100
<b>Noix de Coco</b>	43		12-24	0,3-1	35

Plusieurs chercheurs ont étudié et abordé la compétitivité de la fibre de lin et son adéquation pour le renforcement de la matrice polymère [6, 7, 40-44]. Les fibres de lin comme renfort se présentent sous des formes et configurations différentes (telles que des fibres de mono filaments, des tapis, des mèches, des tissus, etc.) avec diverses techniques de fabrication pour produire des composites (empilage de film, infusion sous vide, moulage par compression, moulage par transfert de résine (RTM), etc.) [43, 45-48].

## 2.4 Structure des composites

En général, les renforts se présentent sous forme de fils individuels, des mats et de tissus. Le choix d'une architecture est fonction du procédé de fabrication utilisé pour la pièce finale ainsi que de sa géométrie et des propriétés envisagées ainsi que la fraction volumique des fibres.

Les fibres végétales sont généralement utilisées sous forme de fibres courtes transformées en mats, ou de granules selon le mode d'obtention des pièces moulées par compression, ou par injection et extrusion, respectivement. Cependant, les composites à fibres courtes sont caractérisés par des propriétés mécaniques faibles. Pour avoir un composite à fibres végétales avec des propriétés élevées, l'utilisation de renforts sous forme de fibres continues est une nécessité.

Dans la Figure 2.4 on remarque bien que les composites fabriqués avec une matrice thermodurcissable ont des propriétés meilleures que ceux fabriqués avec une matrice

thermoplastique. Le procédé de fabrication a donc lui aussi un impact sur les propriétés du matériau composite à fibres unidirectionnelles.[38]

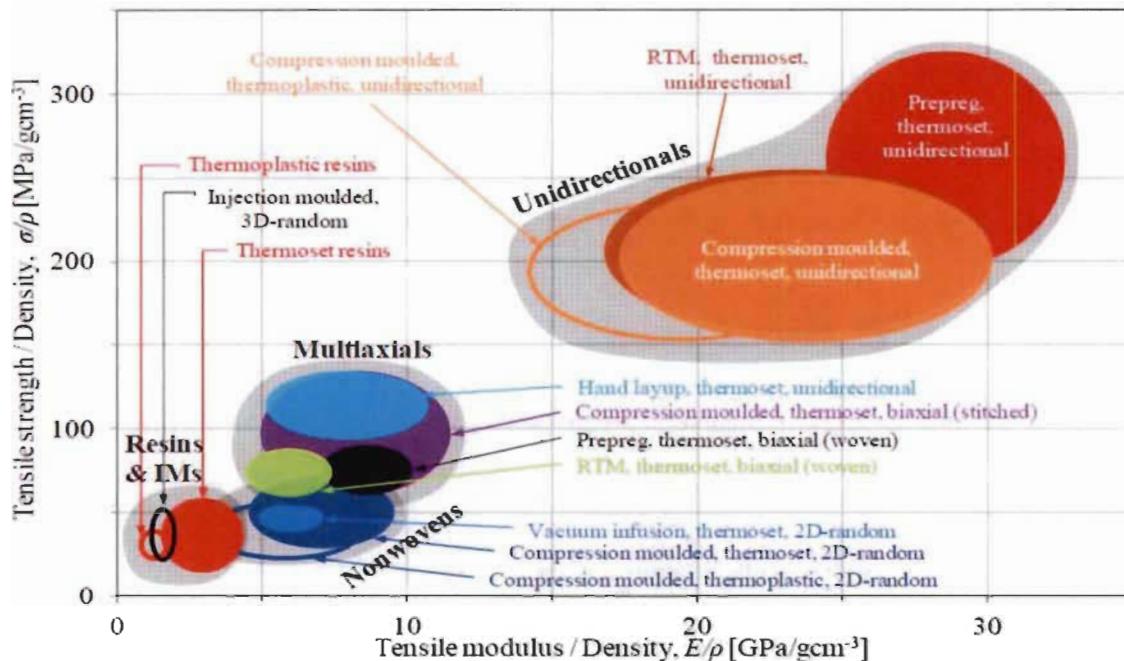


Figure 2.4: Influence du type de la matrice et du procédées de fabrications sur les propriétés du composites[38]

La plupart des recherches sur les composites de fibres de lin se sont concentrées sur les propriétés mécaniques et les traitements fibreux [6, 43, 46, 47, 49]. Pour les propriétés mécaniques, les avantages importants sont une rigidité longitudinale équivalente ou proche de celle des fibres de verre, mais avec une rigidité spécifique généralement beaucoup plus élevée, en raison de la densité inférieure du lin (Tableau 2.3) [43, 47].

Afin d'améliorer les propriétés des composites à fibres naturelles, une approche potentielle consiste à contrôler précisément l'architecture de renforcement en combinant des

fils continus de fibres torsadées et de techniques textiles. Fondamentalement, les fibres sont formées initialement dans un fil continu, qui est ensuite transformé en textiles sur mesure. Cette technique permet la production de composites avec des fractions de volume de fibres relativement élevées (en raison d'un meilleur emballage des fibres), mais elle se caractérise par un coût de fabrication élevé en raison de la forte consommation d'énergie du procédé de tissage [50]. En outre, les fibres doivent être tordues pour produire un fil suffisamment solide pour leur traitement par des machines textiles.

Habibi et al. ont étudié le comportement des CFN à base de fibres courtes de lin avec matrice époxy. Ils ont déterminé les caractéristiques mécaniques du composite en compression et en flexion et les modes de dommage en utilisant la méthode ÉA tout en variant la fraction volumique de fibres (Vf). Selon ces études, la fraction volumique Vf=40% est la valeur optimale qui donne les meilleures propriétés [51].

Tableau 2.3: Résultats de la littérature pour les propriétés de traction des composites en fibres de lin et en fibres de verre

Type de Composite	Type de renforts	Technique de fabrication	Vf (%)	Module de traction (GPa)	Module de traction Spécifique (GPa/gcm <sup>-3</sup> )	Force de traction (MPa)	Force de traction spécifique (MPa/gcm <sup>-3</sup> )	Réf
Fibres courtes								
Lin/UP	2D-aléatoire	Infusion sous vide	30	6.3	5.2	61	50	[52]
Lin /epoxy	2D-aléatoire	Infusion sous vide	22	9.2	6.5	60	42	[53]
Lin /UP	Tapis	RTM	25	6,5	4,3	75	50	[54]
Lin /UP	Tapis	RTM	31	5,8	3,9	37	24	[54]
Verre-E/UP	2D-aléatoire	Infusion sous vide	30	14.9	9.1	190	116	[55]
Fibres longues								
Lin /epoxy	Unidirectionnel	RTM	42	35.0	28.2	280	226	[45]
Lin /epoxy	Unidirectionnel	Pré-imprégnation	42	39.9	31.3	378	296	[56]
Lin /epoxy	Unidirectionnel	Pré-imprégnation	48	32.0	24.7	268	207	[57]
Lin /epoxy	Unidirectionnel	Moulage par compression	22	13	-	208	-	[58]
Lin /epoxy	Unidirectionnel	Moulage par compression	42	22	-	362	-	[58]
Lin /epoxy	Unidirectionnel	Moulage par compression	51	26	-	408	-	[58]
Lin /epoxy	Unidirectionnel	Infusion sous vide	40	28	-	133	-	[46]
Lin /epoxy	Unidirectionnel	Moulage par compression	32	15	-	138	-	[47]
Verre-E /epoxy	Unidirectionnel	RTM	48	31.0	18.1	817	478	[45]
Tissu								
Lin /epoxy	Tissu simple (1/1)	Infusion sous vide	32	6.86	-	69.39	-	[40]
Lin /epoxy	Tissu simple (1/4)	Infusion sous vide	27	8.61	-	94.02	-	[40]
Lin /epoxy [0, 90]	Biaxial équilibré cousu	Moulage par compression	44	14.3	11.2	170	133	[42]
Lin /epoxy [0, 90]	2 × 2 tissé biaxial	Pré-imprégnation	45	11.2	8.2	94	69	[59]
Lin /epoxy [0, 90]	2 × 2 tissé biaxial	Pré-imprégnation	36	10.0	7.5	104	78	[59]
Lin /epoxy [0, 90]	2 × 2 tissé biaxial	Pré-imprégnation	54	9.3	6.8	78	57	[60]
Verre-E /epoxy [0, 90]	Biaxial équilibré cousu	Moulage par compression	43	21.9	12.2	380	212	[42]
Lin /VE [0, 90]	Tissu simple	RTM	33	7.3	4.8	81	54	[54]
Lin /VE [0, 90]	Tissu simple	RTM	35	8,6	5,7	89	59	[54]
Lin /epoxy [ $\pm 45$ ]	Biaxial équilibré cousu	Moulage par compression	44	6.5	5.1	79	62	[42]
Verre-E /epoxy [ $\pm 45$ ]	Biaxial équilibré cousu	Moulage par compression	43	11.1	6.2	103	58	[42]

## 2.5 Les résines

La protection des fibres est assurée par un liant appelé matrice. Les matériaux les plus couramment utilisés sont les résines thermodurcissables et thermoplastiques.

Les résines époxy présentent des propriétés mécaniques élevées (résistance et module en traction et en compression) et une résistance à la dégradation lorsqu'elle est mise en contact avec les solvants présents dans l'environnement [60]. De plus, les résines époxy peuvent facilement réagir avec les groupes hydroxyles de la fibre de lin. Car à une température élevée ( $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), la viscosité du polymère diminue jusqu'à la formation d'un réseau tridimensionnel rigide : c'est le phénomène de polymérisation. Contrairement aux résines thermoplastiques, les résines thermodurcissables ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois.

Les résines thermoplastiques sont initialement à l'état solide. Le matériau change de forme en effectuant un chauffage suivi d'un refroidissement. Une fois refroidies, elles récupèrent leur état solide initial (et leurs propriétés) et, par conséquent, offrent l'avantage de pouvoir être refondues et remoulées même après polymérisation. L'industrie automobile les utilise pour leur malléabilité sous forme de composites à fibres courtes injectables et de composites estampables. Les thermoplastiques sont très peu utilisées dans les secteurs de pointe à cause de leurs caractéristiques mécaniques faibles en comparaison avec les thermodurcissables.

## 2.6 Les composites sandwichs

Un panneau sandwich est l'assemblage des deux peaux liées à un noyau (âme) par un adhésif (Figure 2.5).

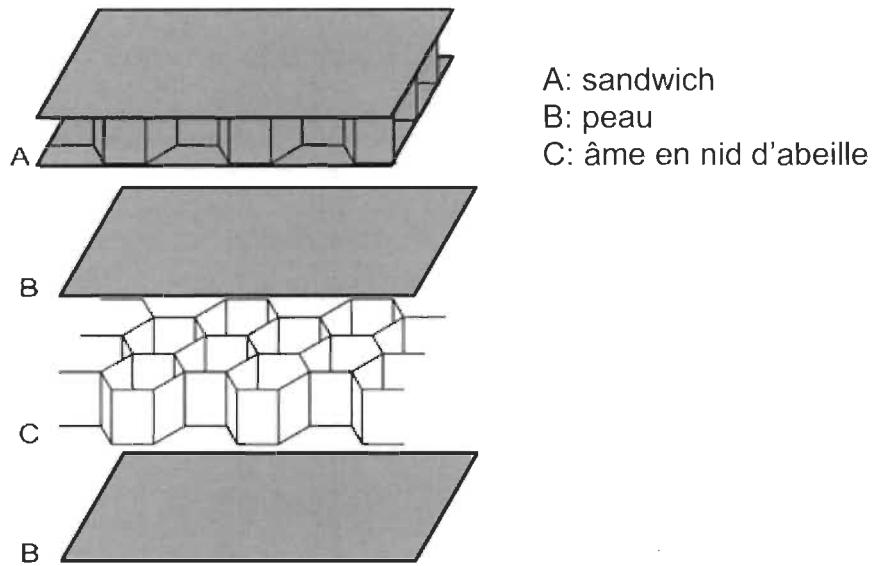


Figure 2.5: Schéma d'un composite sandwich

Ils sont largement utilisés comme moyen de construire des structures légères à haute performance [61, 62]. La rigidité et la résistance à la flexion sont données par les propriétés des peaux. Mis à part son rôle de transmettre le cisaillement entre les feuilles, un noyau avec de bonnes propriétés peut également contribuer à la résistance à la flexion, à la rigidité, au cisaillement et à la compression. Et inversement, il peut dégrader les performances totales de l'assemblage, s'il présente de moins bonnes propriétés mécaniques [61, 63].

Typiquement, les noyaux sont fabriqués à l'aide de structures ondulées, en treillis ou en nid d'abeilles. Les matériaux les plus utilisés dans la fabrication du nid d'abeille sont

l'aluminium[11], les polymères (le coton en polypropylène) [23] et le Nomex (papier) [12, 13].

Les panneaux sandwich sont utilisés non seulement en raison de leurs avantages en termes d'économie de poids et de performances structurelles, mais aussi comme un moyen efficace de réduire les coûts [64].

Sun et al.[65] ont étudié les caractéristiques des panneaux sandwich avec des peaux en fibres de carbone avec une densité de  $200 \text{ g/m}^2$  et avec trois types d'âmes différents : en nid d'abeille, en grille d'aluminium et en nid d'abeille renforcé par une grille qui sont tous en aluminium. Il a démontré que le sandwich avec une âme en nid d'abeille renforcé par une grille en aluminium est la meilleure alternative parmi les trois proposées, pour une sollicitation en compression (Figure 2.6).

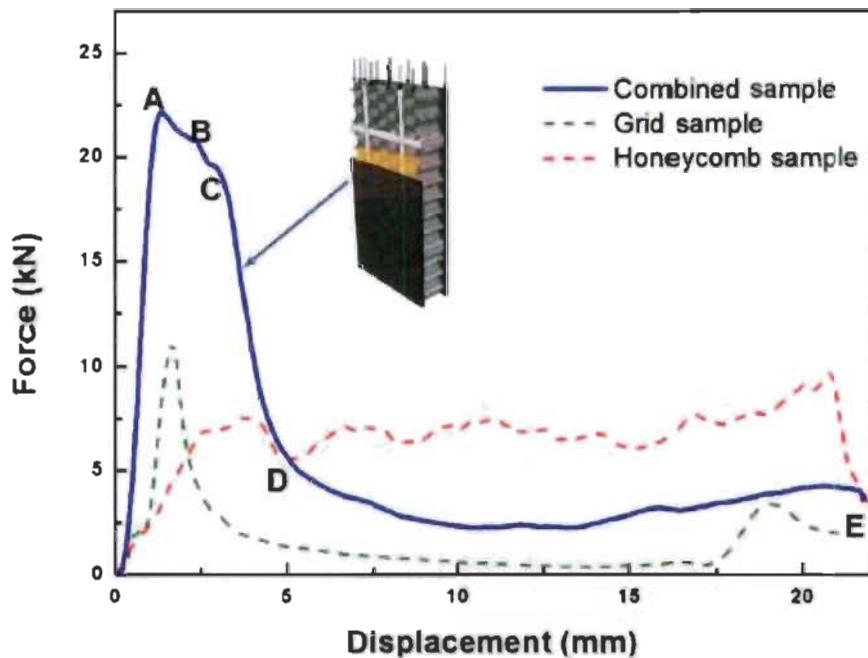


Figure 2.6: Courbe de compression des différentes âmes : nid d'abeille en aluminium, grille en aluminium et la combinaison du nid d'abeille et grille [65]

Plusieurs chercheurs ont aussi travaillé pour développer l'utilisation des fibres naturelles dans des âmes de sandwichs composites. Stocchi et al. [66] ont étudié les caractéristiques d'un noyau en nid d'abeille renforcé par des fibres naturelles sous compression à plat. Un tissu de jute est utilisé comme renfort dans une matrice thermodurcissable (vinylester). Dans cette étude, Stocchi a varié la taille de la cellule du noyau entre 6mm et 10mm. La figure 2.7 montre l'influence de la taille de la cellule sur la charge en compression, en comparaison avec d'autres sandwichs avec renfort à base d'aluminium et de Nomex.

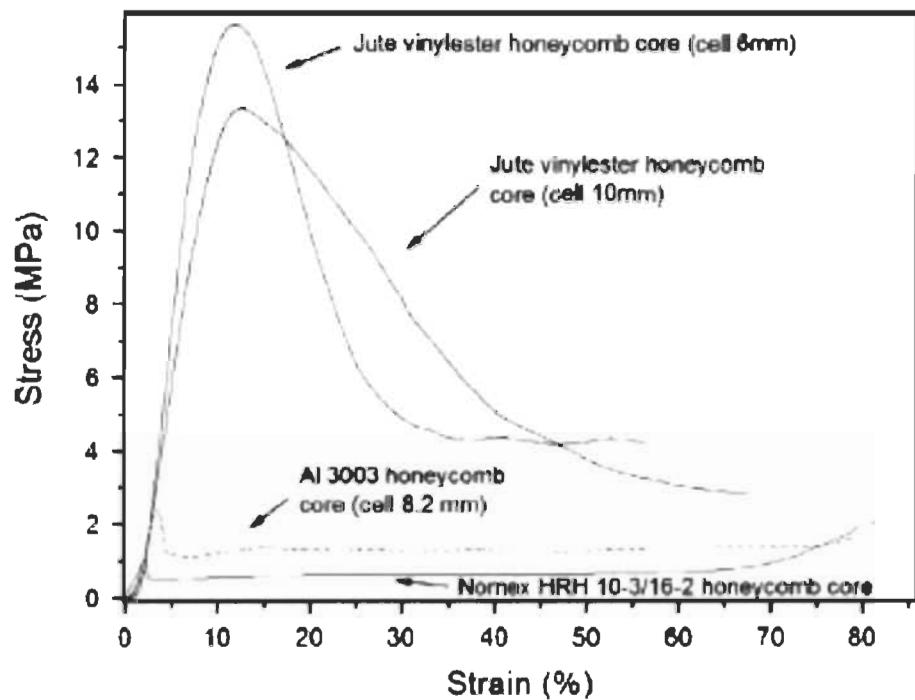


Figure 2.7: Comparaison de la contrainte entre les sandwichs à fibres de jute de 6mm et 10 mm avec d'autres en aluminium et Nomex [66].

# Chapitre 3 - Méthodologie

## 3.1 Fabrication

### 3.1.1 Fabrication des couches en fibres courtes

Les échantillons sont fabriqués au Laboratoire de Mécanique et Eco-Matériaux «LMEM» de l’Université du Québec à Trois-Rivières «UQTR». Les fibres de lin utilisées dans ce travail ont été fournies par la société Safilin sous forme de mèches (Tex 5000) non traitées. Par la suite, les mèches sont coupées à une longueur de 5 à 10 mm en utilisant une tranche à papier haute performance. Pour la fabrication des mats à fibres courtes, on utilise la formette dynamique (Figure 3.1), fabriquée par la compagnie ALIMAND, pour faire des couches de fibres de lin. Cette machine est constituée d’un réservoir, d’une pompe, d’un bras vertical, équipé d’une buse d’injection à son extrémité, et d’un tambour à une tôle perforée muni d’un mouvement de rotation. Selon la fraction volumique désirée, on détermine la masse des fibres à mélanger dans le réservoir de la formette équipé d’un agitateur vertical. Le mélange (eau + fibre courte de lin) est ensuite pompé à travers de la buse, faisant un mouvement vertical de va et vient à l’intérieur du tambour rotatif, et qui projette les fibres sur la toile afin d’obtenir une répartition uniforme des fibres.



Figure 3.1: Formette dynamique

Après l'extraction de la couche de fibres courtes dans la formette, la couche de fibres très humide passe dans une presse pour la comprimer (Figure 3.2-a) puis dans un séchoir de modèle Fornax (Figure 3.2-b) fabriqué par Adirondack Machine Corporation pour éliminer le résiduel d'eau par évaporation.

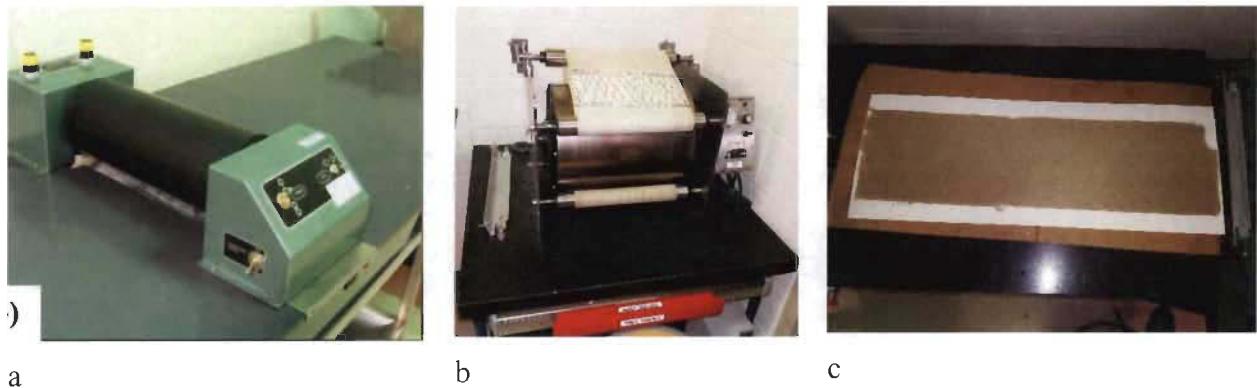


Figure 3.2: a- Presse ; b- Séchoir; c- Couche de fibre courtes

On utilise ces étapes pour la fabrication des couches de densité surfacique de  $400 \text{ g/m}^2$  pour la fabrication des peaux et  $100\text{g/m}^2$ ,  $150 \text{ g/m}^2$  et  $200 \text{ g/m}^2$  pour la fabrication du nid d'abeille.

### 3.1.2 Moulage des peaux

Après avoir séché la couche de fibres, celle-ci va être coupée selon les dimensions du mat à mouler. Les mats ont été fabriqués par procédé de moulage par compression. Pour déterminer précisément l'épaisseur ( $d$ ) du mat, on se réfère à la formule suivante [67, 68]:

$$V_f = \frac{N \times W_f}{d \times \rho} \quad \text{Équation 3.1}$$

Avec :

$V_f$ : la fraction volumique du composite est égale à 40% dans notre cas [51].

$N$  : le nombre de couches de mats (2, 3 ou 4 couches).

$W_f$ : La densité surfacique de couches de mats (100, 150 ou 200 g/m<sup>2</sup>).

$\rho$ : la densité des fibres de lin (1,45 g /cm<sup>3</sup>) [69].

La matrice est constituée d'un système de durcissement 820 époxy / 824 fourni par Adtech Plastic et mélangé selon le rapport durcisseur / résine (18/100) recommandé par le fournisseur.

Le moule reçoit un film de cire pour faciliter le démoulage. En utilisant une gomme collante, on fait un cadre ayant la largeur des couches. Puis on commence le procédé de moulage : on imprègne les couches dans la résine époxy en faisant attention de bien extraire les bulles d'air emprisonnées entre les couches en utilisant un rouleau. On reprend le même processus pour les autres couches (Figure 3.3).

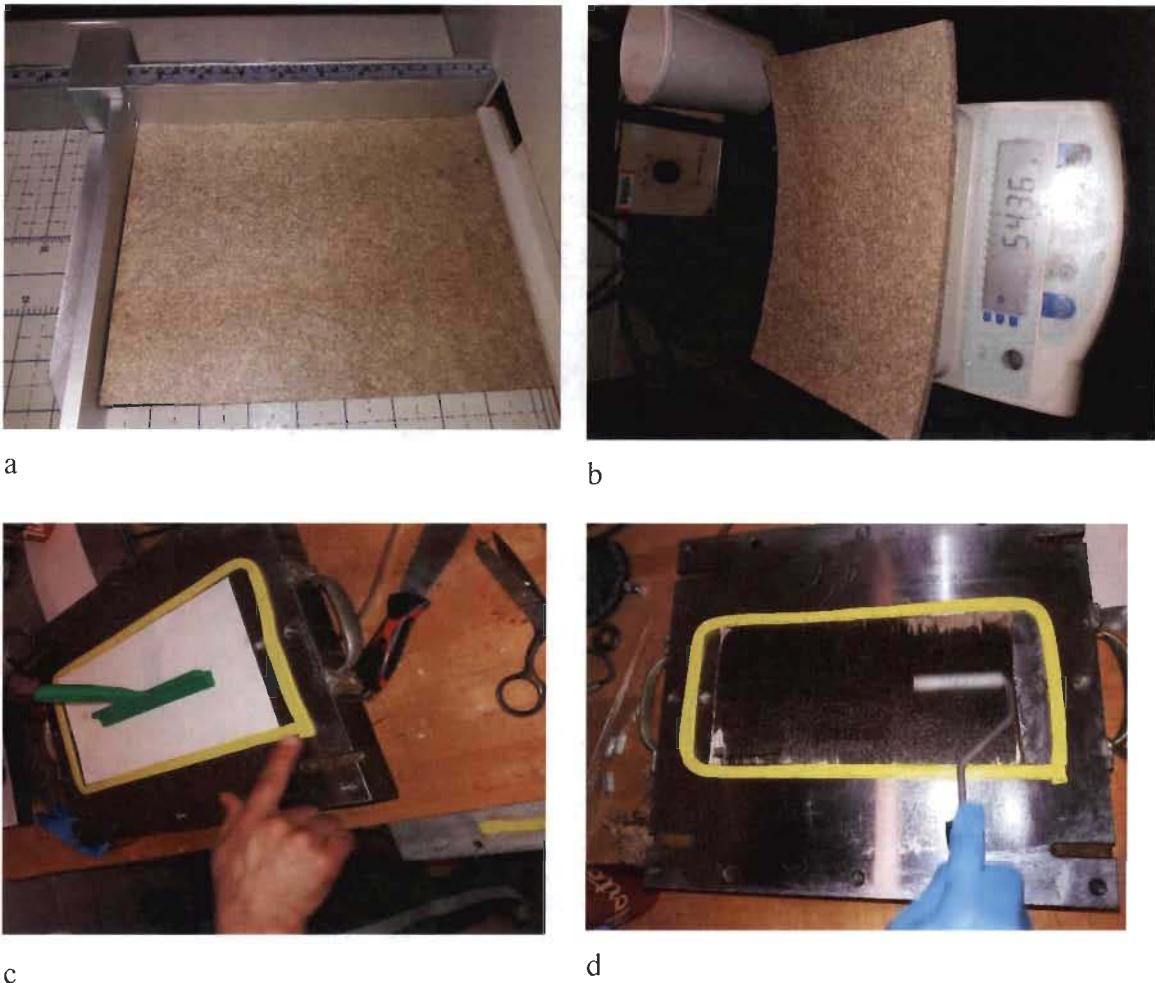


Figure 3.3: a- Découpage ; b-Pesage; c-Préparation du moule; d- moulage à la main

Après l'imprégnation de toutes les couches, le moule est refermé en utilisant des vis de fixation tout en mettant des cales ayant l'épaisseur du mat. Le moule est ensuite transféré vers le four où il va rester 4h à une température de 100 °C pour obtenir une plaque de composite (Figure 3.4).

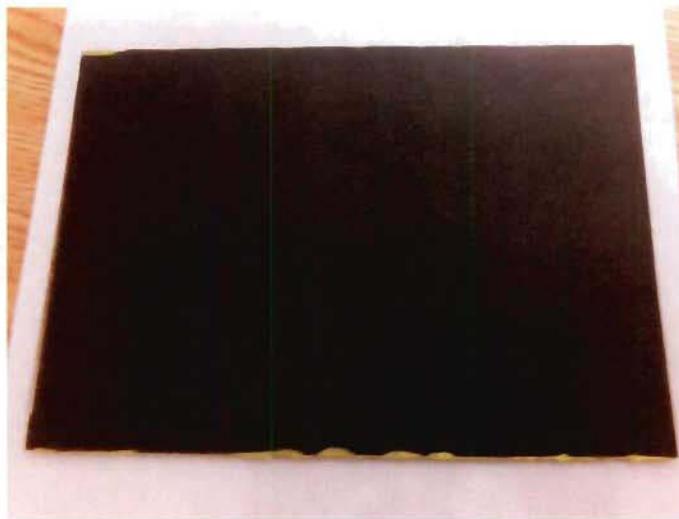


Figure 3.4: Plaque de composite de fibres courtes

Après l'extraction de la pièce, on fait le nettoyage de son contour en utilisant une scie à diamant. Puis, on la met au four pendant 4h à 70 °C selon la recommandation du fournisseur de la résine. La plaque est refroidie à l'air libre.

### 3.1.3 Moulage des nids d'abeille

Les noyaux en nid d'abeille ont été fabriqués par moulage par compression à l'aide d'un moule en aluminium fabriqué au LMEM, illustré à la figure 3.5. Les écrous hexagonaux en aluminium sont fixés dans des barres en aluminium rectangulaires, avec un espacement spécifique entre eux pour assurer une épaisseur uniforme de la paroi cellulaire du noyau de 1mm. Le moule utilisé permet de produire des échantillons de nids d'abeilles avec une taille de cellule de 6,35 mm, une épaisseur maximale de cœur de 25,4 mm, une longueur maximale de 300 mm et une largeur maximale de 125 mm.

Pour préparer les nids d'abeilles renforcés de fibres, le mat de lin est coupé en bande rectangulaire avec une largeur légèrement supérieure à l'épaisseur finale du noyau. Ensuite, il est imprégné de résine époxy pour obtenir une sorte de pré-imprégné, avant de le placer dans le moule. Par la suite, les couches de pré-imprégnés sont placées sur le moule (Figure 3.5 (c)) et ce dernier est finalement refermé en appliquant une force de serrage à l'aide de barres de serrage et de vis. Les forces de serrage sont appliquées en trois positions pour assurer une répartition uniforme de la force, par conséquent une épaisseur uniforme de la paroi cellulaire du noyau, et pour éliminer l'excès de résine. Enfin, les noyaux ont été post-durcis pendant 4 h à 100 °C dans un four.

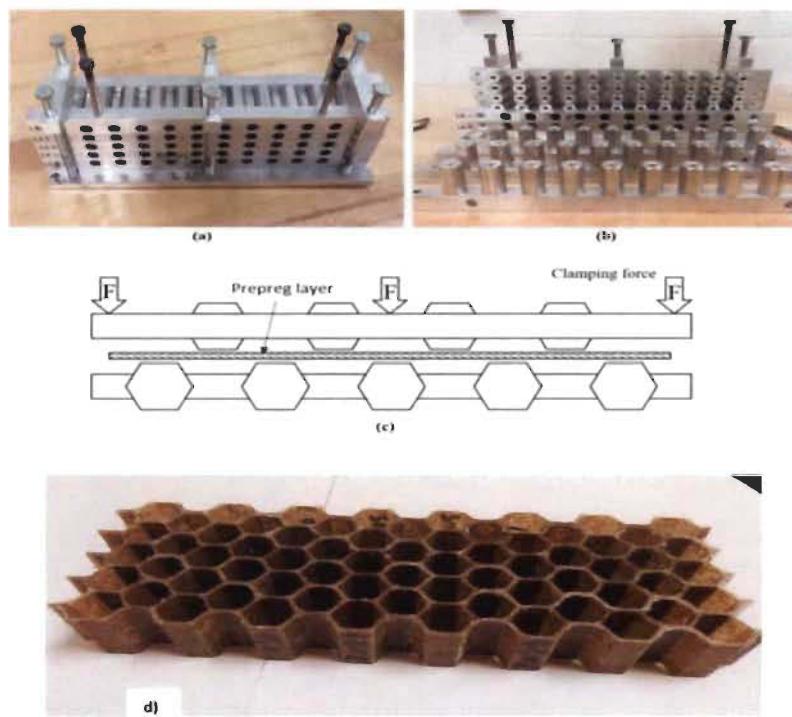


Figure 3.5: Moule de fabrication de nid d'abeille, a) vue assemblée, b) vue éclatée, c) vue schématique, d) nids d'abeille

Après l'extraction du nid d'abeille, on en fait le polissage des deux faces avec une polisseuse à tambour à papier sablé afin d'avoir une planéité meilleure que celle de la pièce brute. Cette opération est très importante pour la caractérisation mécanique (essais) : on évite ainsi d'avoir des charges mal réparties en compression et on élimine le glissement (cisaillement) des peaux en flexion.

### 3.1.4 Assemblage des sandwichs

Après avoir préparé les âmes et les peaux, l'étape suivante est l'assemblage de ces derniers pour avoir des panneaux sandwichs (Figure 3.6).

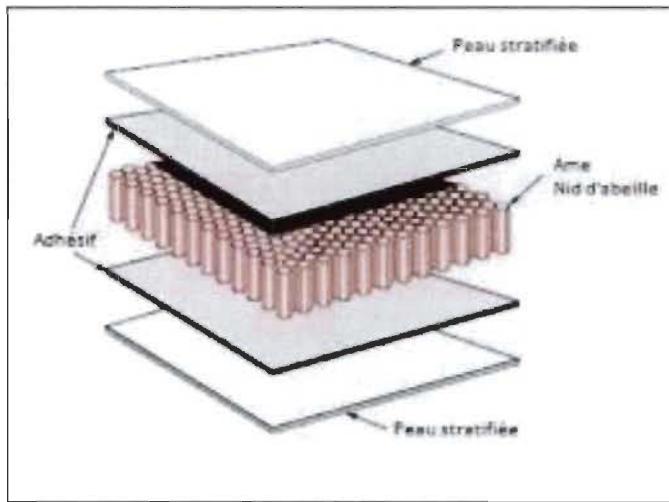


Figure 3.6: Schéma explicatif d'un panneau sandwich

Pour le collage des peaux sur l'âme, dans un premier essai nous avons utilisé directement la résine époxy. Le panneau sandwich a ensuite été cuit pendant 4h dans un four à 70 °C. Cette solution s'est avérée inadéquate car lors de l'essai de la flexion 3 points les

échantillons cisailaient très rapidement dans la partie qui relie les peaux à l'âme. De ce fait, une autre solution a été élaborée. C'est l'assemblage du sandwich en utilisant un film collant double face de marque Scotch 3M (Figure 3.7). Selon le fabricant le produit peut supporter 15Kg. Des essais ont été effectués afin de valider cette solution et des résultats beaucoup plus favorables et stables ont été observés.

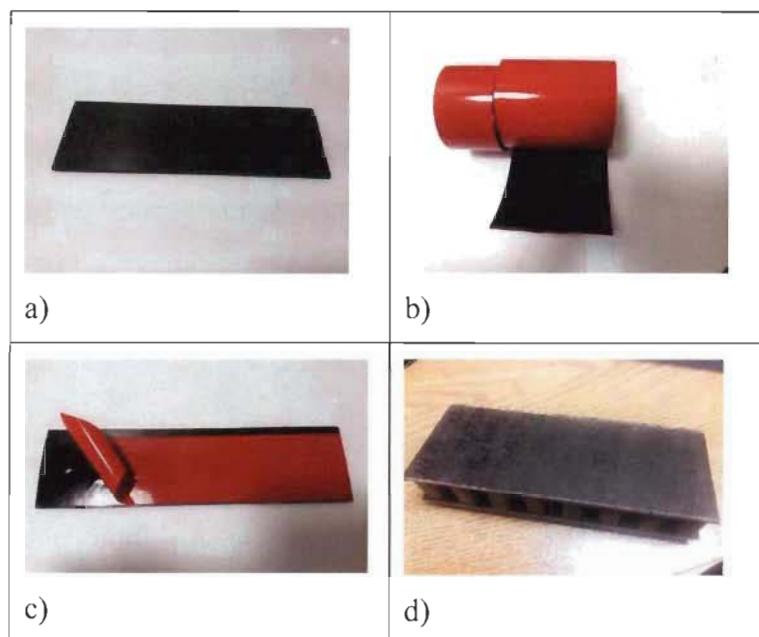


Figure 3.7: a) peau à fibres courtes, b) scotch 3M, c) collage de l'adhésif sur la peau, d) sandwich en nid d'abeille à fibres courtes

Après avoir préparé les échantillons nécessaires pour les essais, l'étape suivante est la caractérisation des sandwichs. Deux types d'essais ont été réalisés : essai de compression et essai de flexion 3 points.

## 3.2 Caractérisation

### 3.2.1 Essais de compression

L'essai de compression a été réalisé selon la norme ASTM C365 afin de déterminer la contrainte et le module en compression des nids d'abeille à fibres courtes, sans les peaux, tout en tenant compte de leurs différentes densités surfaciques ( $100 \text{ g/m}^2$ ,  $150 \text{ g/m}^2$  et  $200 \text{ g/m}^2$ ). Pour cela, une machine MTS est utilisée avec un outillage spécial pour ce genre d'essai, comme présenté dans la Figure 3.8-a). La Figure 3.8-b) présente l'échantillon utilisé pour l'essai de compression. Une scie à ruban est utilisée pour préparer l'échantillon.

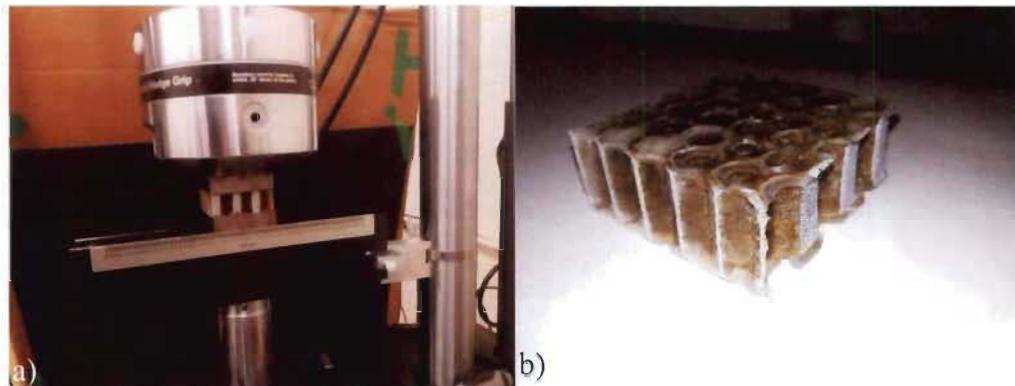


Figure 3.8: a) Essai de compression, b) Échantillon pour l'essai de compression

Pour avoir plus de résultats et de données sur le comportement de ce matériau, une caméra CCD a également été installée lors de l'essai pour capter des images selon une période prédéfinie. Un film moucheté est collé sur la paroi avant du nid d'abeille pour déterminer l'évolution de la déformation en fonction du temps et d'autres caractéristiques.

Deux capteurs d'émission acoustique ont pour leur part été installés sur la pièce pour la détection des modes de dommage dans le composite (Figure 3.9).

Il s'est avéré que la quantité de résultats à traiter avec l'ÉA convenait déjà largement à une étude de type mémoire, les données de caméra CDD n'ont donc pas été exploitées. Elles feront par contre l'objet d'études futures.

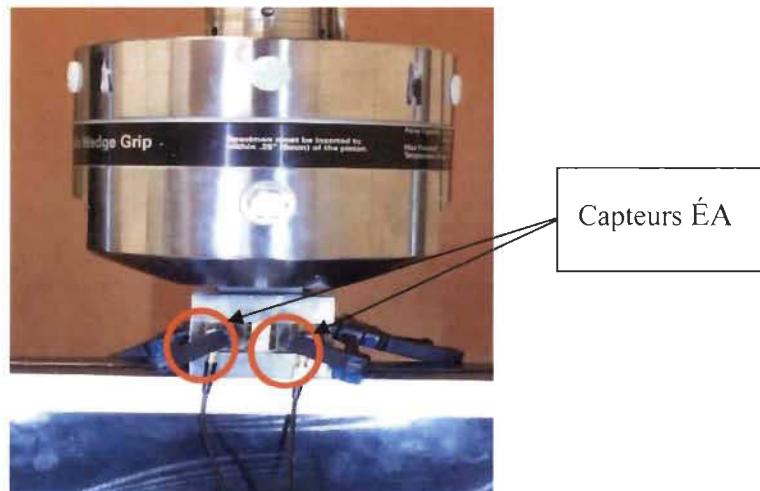


Figure 3.9: Installation des capteurs d'émission acoustique sur la pièce en compression

### 3.2.2 Essais de flexion 3 points

L'essai de flexion 3 points a été réalisé selon la norme ASTM C393. Les différentes combinaisons sont illustrées dans le tableau 3.1. Peu importe leur nombre de couches, toutes les peaux ont un Vf de 40%. Tout comme l'essai de compression, les noyaux ont pour leur part une densité surfacique de  $100\text{g/m}^2$ ,  $150\text{ g/m}^2$  et  $200\text{ g/m}^2$ .

Tableau 3.1 : Plan d'expérience pour l'essai de flexion à trois points

N	Combinaison
1	2 couches x NA100
2	3 couches x NA100
3	4 couches x NA100
4	2 couches x NA150
5	3 couches x NA150
6	4 couches x NA150
7	2 couches x NA200
8	3 couches x NA200
9	4 couches x NA200

Chaque combinaison a été répétée 3 fois pour la validation statique des résultats.

La machine MTS est aussi utilisée pour le présent essai (Figure 3.10). Un montage approprié pour ce genre d'essai est mis en place sur la machine et les capteurs ÉA sont placés sur les échantillons (Figure 3.11).

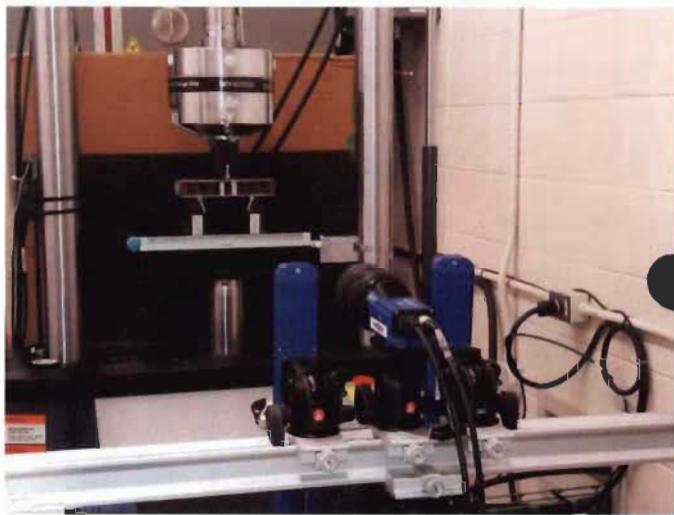


Figure 3.10: Essai de flexion à trois points

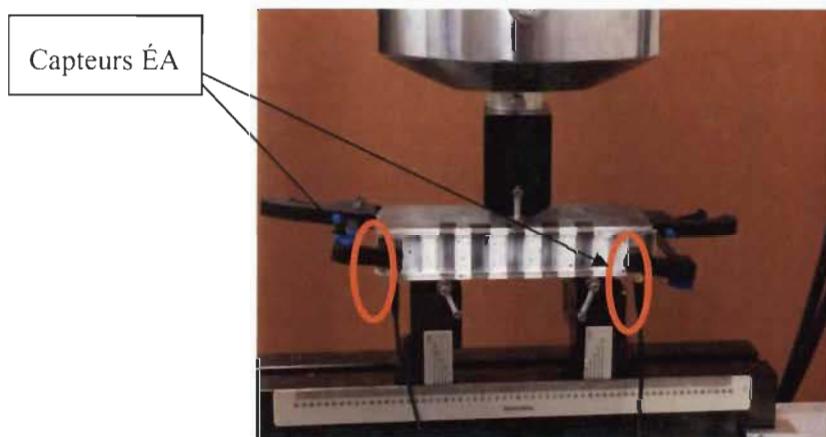


Figure 3.11: Installation des capteurs d'émission acoustique sur la pièce en flexion

Un schéma récapitulatif de la fabrication et caractérisation mécanique est illustré à la figure 3.12.

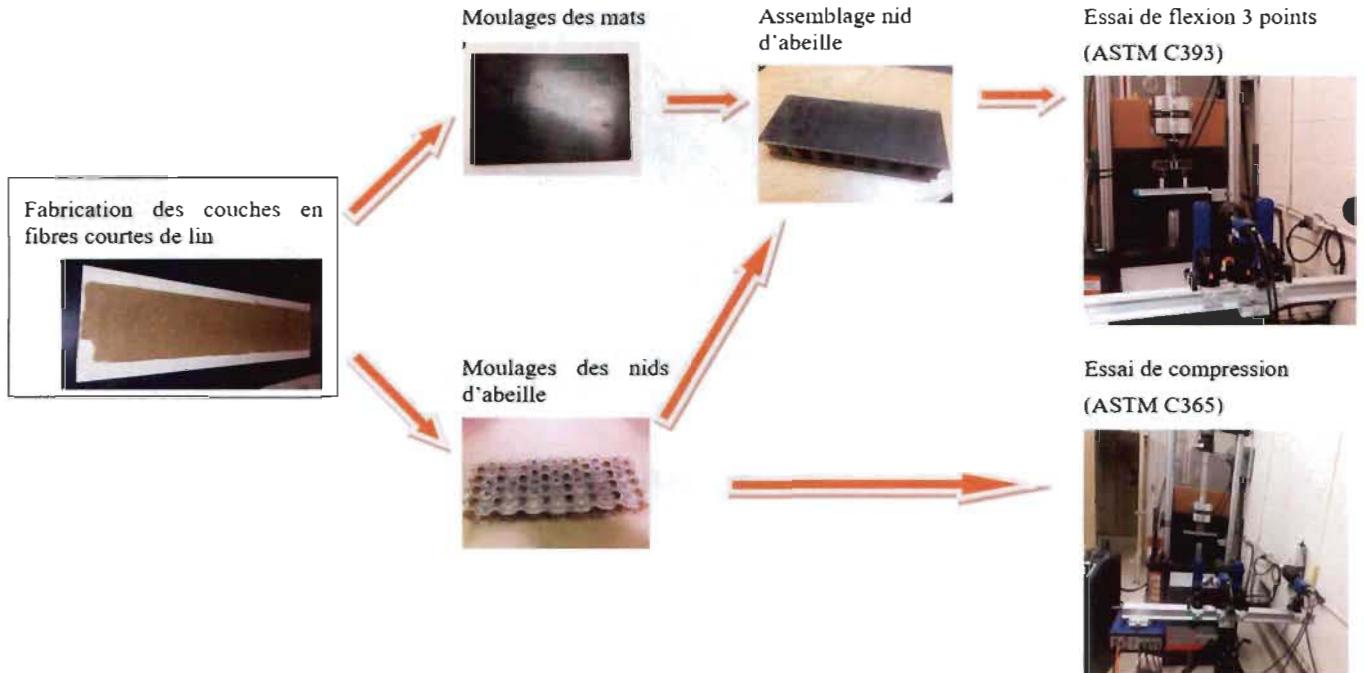


Figure 3.12: Fabrication et modélisation mécanique en compression et flexion

### 3.3 Émission acoustique

L'ÉA présente un intérêt en sciences des matériaux car elle permet de détecter les mécanismes d'endommagement au sein d'un matériau sollicité et de les identifier. En effet, lors d'un essai instrumenté en ÉA le signal généré par la source se propage au sein du matériau, il est ensuite mesuré par deux capteurs placés sur les échantillons testés, les âmes et les sandwiches respectivement pour les essais de la compression et la flexion, et il est enregistré et exploité par le système d'acquisition Vallen System. Le type de capteur utilisé et son positionnement à la surface du matériau modifient la forme du signal mesuré. Ainsi,

entre sa création et sa visualisation par l'utilisateur, le signal subit de nombreuses transformations.

### 3.4 Optimisation

Les résultats obtenus par les essais de caractérisation mécanique sont ensuite utilisés comme entrées d'un programme Matlab. L'idée est qu'un utilisateur puisse demander au logiciel de concevoir un matériau avec des propriétés mécaniques (en compression ou en flexion) spécifiques. Elles sont alors entrées dans la « consigne 1 » pour la contrainte de compression et dans la « consigne 2 » pour la contrainte en flexion (figure 3.13). L'optimisateur va rechercher les valeurs adéquates d'épaisseur de peaux et de densité d'âme ayant les caractéristiques les plus proches que celles introduites dans les consignes. Ceci revient à minimiser l'erreur entre la consigne et la valeur issue du modèle tout en minimisant aussi le coût, selon la formule suivante :

$$\min Y = w_1|c_1 - y_1| + w_2|c_2 - y_2| + w_3y_3 \quad \text{Équation 3.2}$$

Avec

$c_i$  : consigne normalisée introduite par l'utilisateur pour la compression ( $c_1$ ) et la flexion ( $c_2$ )

$y_i$  : valeur normalisée prédite par le modèle pour la compression ( $y_1$ ), la flexion ( $y_2$ ) et le coût ( $y_3$ )

$w_i$  : poids relatif donné à l'une des trois variables à optimiser

Un réseau de neurones (RDN) est utilisé pour la modélisation et un algorithme génétique (AG) pour l'optimisation [70-72].

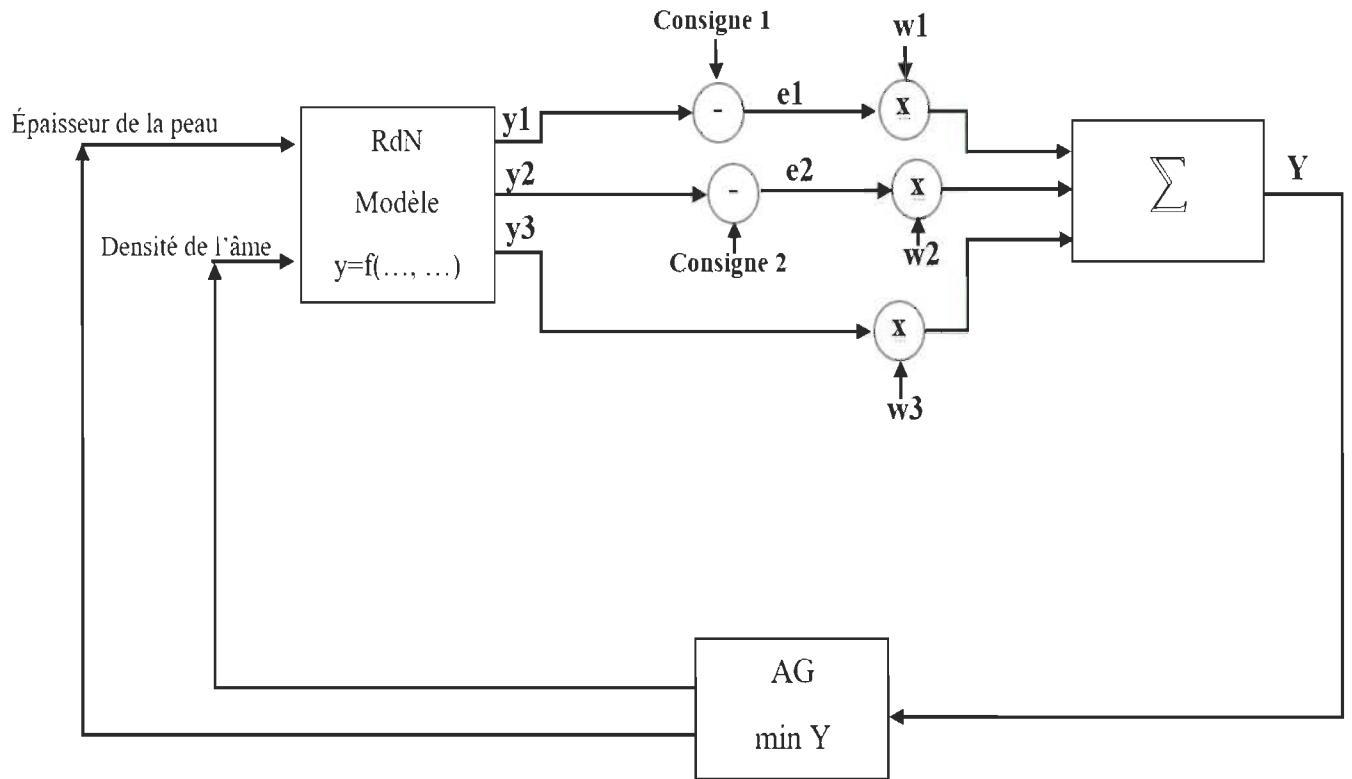


Figure 3.13: Optimisation par réseau de neurones (RDN) et algorithme génétique (AG)

# Chapitre 4 - Résultats et discussion

## 4.1 Essai de compression

### 4.1.1 Caractérisation mécanique

Les propriétés mécaniques des matériaux composites sont fortement influencées par la fraction volumique (ou la fraction surfacique) des fibres [51, 67, 73]. Selon les résultats de [51] nous avons utilisé un Vf constant de 40%.

Les propriétés des nids d'abeilles en compression sont indiquées dans le tableau 4.1. Pour déterminer les propriétés spécifiques du matériau composite, un pycnomètre a été utilisé avec des échantillons de dimensions 40x50mm. Chaque test a été répété trois fois.

Tableau 4.1 : Tableau des propriétés des nids d'abeille pour l'essai de compression

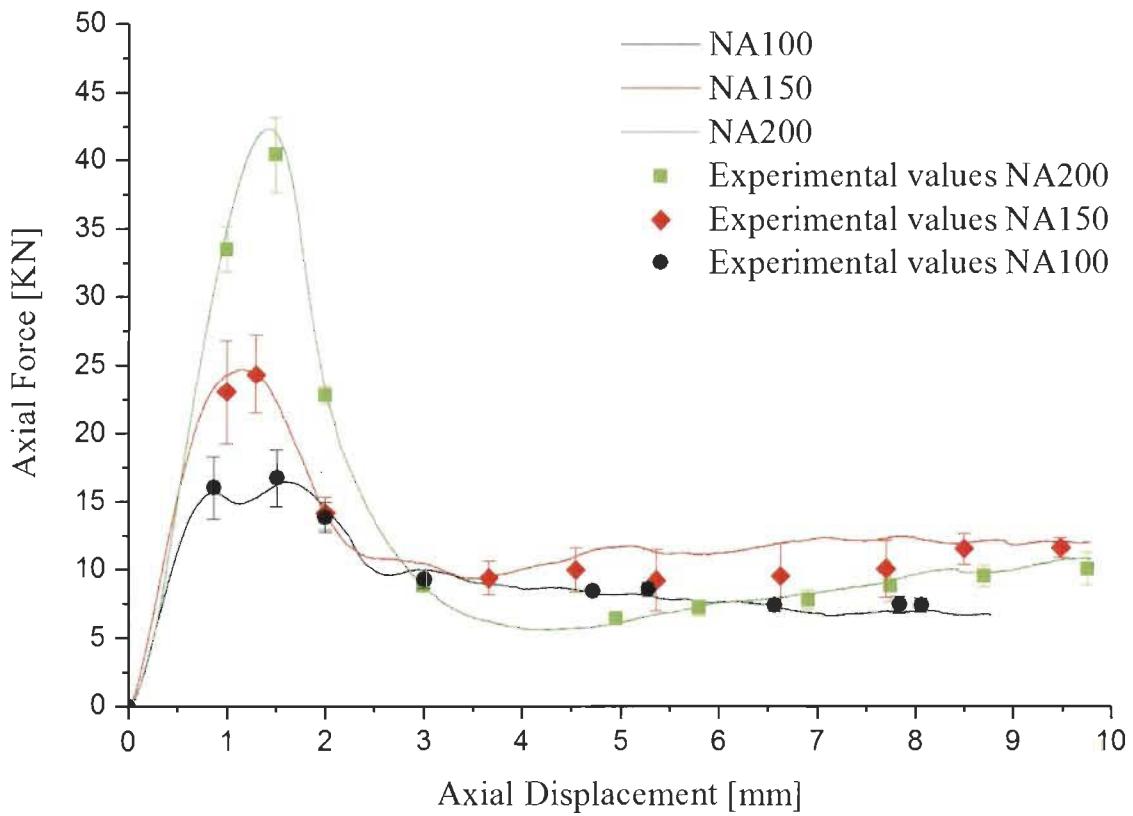
Echantillons	Densité (g/m <sup>2</sup> )	E (Mpa)	Ecart type	E spécifique (Mpa/Kg.m <sup>-3</sup> )	Ecart type	$\sigma$ (Mpa)	Ecart type	$\sigma$ spécifique (Mpa/Kg.m <sup>-3</sup> )	Ecart type
NA100	100	101,84	4,20	93,14	3,84	3,6	0,25	3,29	0,23
NA150	150	140,73	5,22	123,08	4,57	5,24	0,28	4,58	0,25
NA200	200	186,01	8,80	153,45	7,26	8,7	0,44	7,18	0,36

\*NAxxx: Nid d'Abeille avec une densité surfacique xxx (g/m<sup>2</sup>)

Les résultats obtenus lors des essais de compression sont présentés au tableau 4.1 et à la figure 4.1 pour les trois densités de surface différentes des noyaux. Il est à noter que la

force axiale maximale augmente avec la densité de surface, passant de 16,45 kN à 24,75 kN à 42,38 kN pour NA100, NA150 et NA200, respectivement.

La courbe de compression du NA100 en fonction du déplacement présente deux maximums. Dans ce cas, un phénomène de flambement des cellules du noyau est observé après le premier pic. Ceci est suivi par l'effondrement final de tout le noyau après le deuxième pic. Cela rend la zone de la charge maximale de la courbe plus aplatie. Pour NA150 et NA200, cette zone devient plus aiguë en raison de la densité accrue des fibres. Ces matériaux étaient donc plus résistants au flambement initial dans notre étude.



NAXXX : Noyau de densité surfacique de XXX g/m<sup>2</sup>

Figure 4.1: Courbes de compression des noyaux avec différentes densités

Les figures 4.2-A) et 4.2-B) montrent le module et la contrainte en fonction de la densité surfacique. Les courbes sont clairement linéaires pour les deux propriétés.

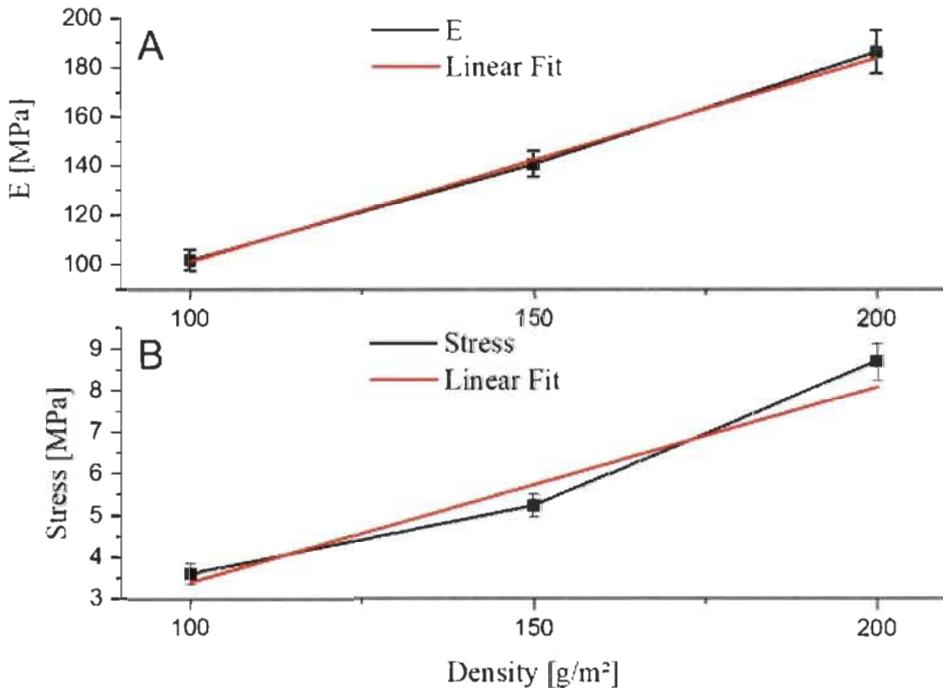


Figure 4.2: A) Module d'Young et B) Contrainte, en fonction de la densité surfacique des noyaux

#### 4.1.2 Emission acoustique

##### 4.1.2.1 Energie cumulée

Le critère de l'énergie cumulée a été utilisé pour caractériser les mécanismes de défaillance dans les échantillons testés. Les forces axiales de la figure 4.1 sont à nouveau présentées à la figure 4.3 avec les courbes d'énergie obtenues à partir de l'ÉA.

L'énergie cumulée augmente avec le déplacement. Pour le NA100, l'énergie augmente lentement dans l'intervalle [0.9mm, 1.1mm], après quoi elle augmente avec une pente beaucoup plus grande. Pour le NA150, l'énergie cumulée augmente de façon exponentielle

dans l'intervalle [1,1 mm, 1,5 mm], ce qui traduit une augmentation de l'activité acoustique et le déclenchement possible d'un ou plusieurs mécanismes de dommage. La pente de l'énergie acoustique commence à diminuer après 1,6 mm, mais l'accumulation continue de croître. Cela reflète une continuité dans la détection d'événements et l'évolution des dommages à l'intérieur du matériau. Pour le troisième échantillon NA200, aucun événement acoustique n'a été détecté jusqu'à ce que le déplacement axial atteigne 0,5 mm, ce qui correspond à une charge axiale de 15 N (0,04% de la charge maximale). L'énergie augmente en pente presque verticale pour l'intervalle [1,75 mm - 1,9 mm], ce qui correspond exactement à l'affaissement du noyau (après que le pic de la force axiale a été atteint).

En conclusion on remarque que les noyaux plus denses ont une plus grande capacité à emmagasiner l'énergie de compression. Dans cette étude l'énergie acoustique cumulée du NA200 est plus de 16 fois supérieure à celle du NA100.

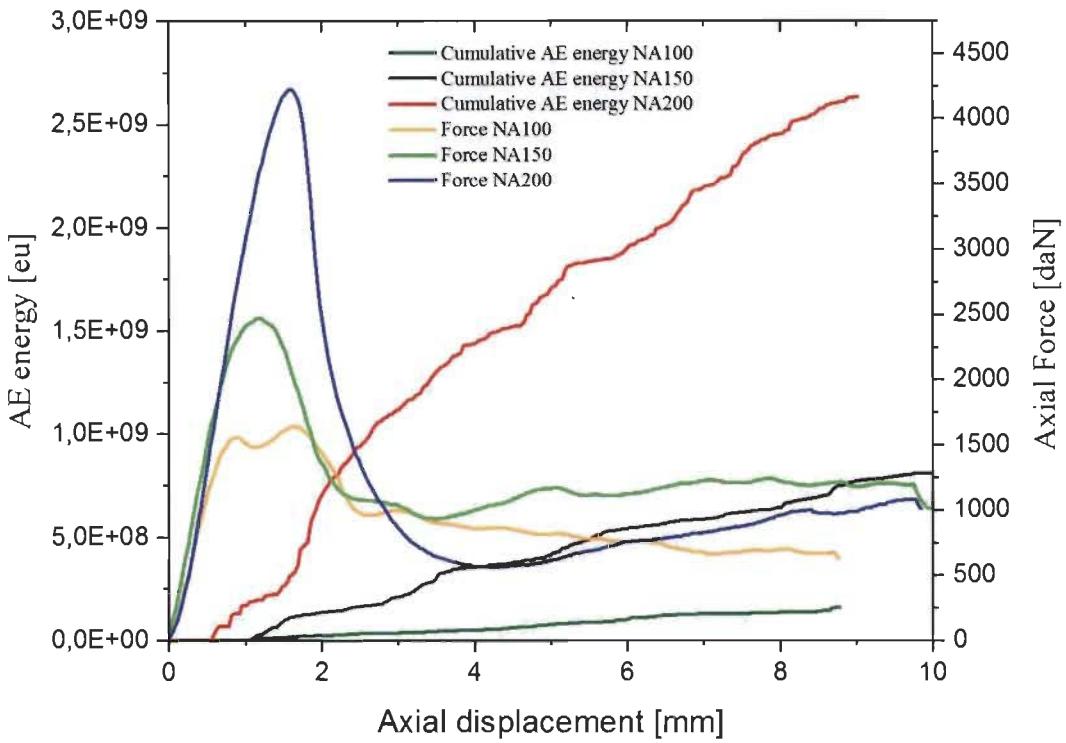


Figure 4.3: Courbe de la force en compression et énergie cumulative AE pour les trois densités testées

#### 4.1.2.2 Classification des événements acoustiques et des modes d'endommagement

L'analyse multi-variables permet de regrouper des événements acoustiques correspondants à certains phénomènes physiques se produisant à l'intérieur du composite alors qu'il est sollicité en compression. Spécifiquement, en fonction de la magnitude des événements localisés, les différents mécanismes de dommage et leur évolution au cours des tests de caractérisation peuvent être identifiés. Le tableau 4.2 présente des exemples de la littérature permettant d'identifier trois modes de dommages importants pour les composites sous charge [51, 67, 74, 75].

Tableau 4.2: Résultats de la littérature sur la classification des modes d'endommagement selon les amplitudes des évènements acoustiques

<b>Composites</b>	<b>Matrix cracking</b>	<b>Fiber pull out</b>	<b>Fiber breakage</b>	<b>Ref.</b>
Flax/Epoxy	30-78 dB	50-78 dB	58-85 dB	[51]
Flax/Epoxy	40-60 dB	60-80 dB	70-90 dB	[67]
Flax/LPET	40-50 dB	45-60 dB	80-96 dB	[74]
Flax/Epoxy	42-60 dB	60-70 dB	70-100dB	[75]

Pour définir les limites d'amplitude acoustique de notre propre matériau, une analyse de données multivariée a été réalisée sur l'ensemble des données de tests de compression en utilisant l'algorithme fuzzy-k-means [67]. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.3. Différentes amplitudes acoustiques, durée et nombre d'évènements sont attribués aux trois différents modes de dégradation que sont : la fissuration de la matrice (matrix cracking), l'arrachement de la fibre (fiber pull out) et la rupture de la fibre (fiber breakage).

Tableau 4.3: Résultats de l'analyse multi-variable utilisée dans cette étude.

Paramètres	Matrix cracking	Fiber pull out	Fiber breakage
Count range	=<73	=<200	>=300
Amplitude [dB]	40-80	40-100	60-100
Duration [ $\mu$ s]	=<380	380=<D=<1215	>=1210

Les figures 4.4 A, B montrent les résultats pour NA100, tandis que les figures 4.4 C, D et 4.4 E, F montrent les résultats pour NA150 et NA200, respectivement. Les amplitudes des événements acoustiques sont indiquées à gauche (A, C et E), tandis que les courbes force-déplacement corrélées aux courbes d'énergie acoustique cumulative de chaque mode de dommage sont indiquées à droite (B, D et F). Différentes couleurs et symboles sont utilisés pour différencier les modes d'endommagement.

En commençant par les amplitudes des événements acoustiques (courbes de gauche de la figure 4.4), on remarque que selon la couleur des points, le premier mode (fissuration de la matrice) commence tôt, à environ 0,5 mm du déplacement. Sa densité augmente jusqu'à la fin du test pour les trois densités de surface. L'arrachement de la fibre apparaît plus tard avec un déplacement d'environ 1mm. Il commence par une densité inférieure à celle du premier mode et dans ce cas, sa densité diminue jusqu'à la fin du test. Le dernier mode, la rupture de fibre, semble être moins uniformément réparti et sa densité est assez faible comparée aux deux autres modes. Pour NA100, ce mode est presque dispersé sur toute la courbe. Mais pour NA150 et NA200, ce mode indique une concentration dans la zone où le noyau s'effondre (après le pic). Pour NA200, ce mode est également presque absent dans la partie centrale du test et réapparaît à la fin du test.

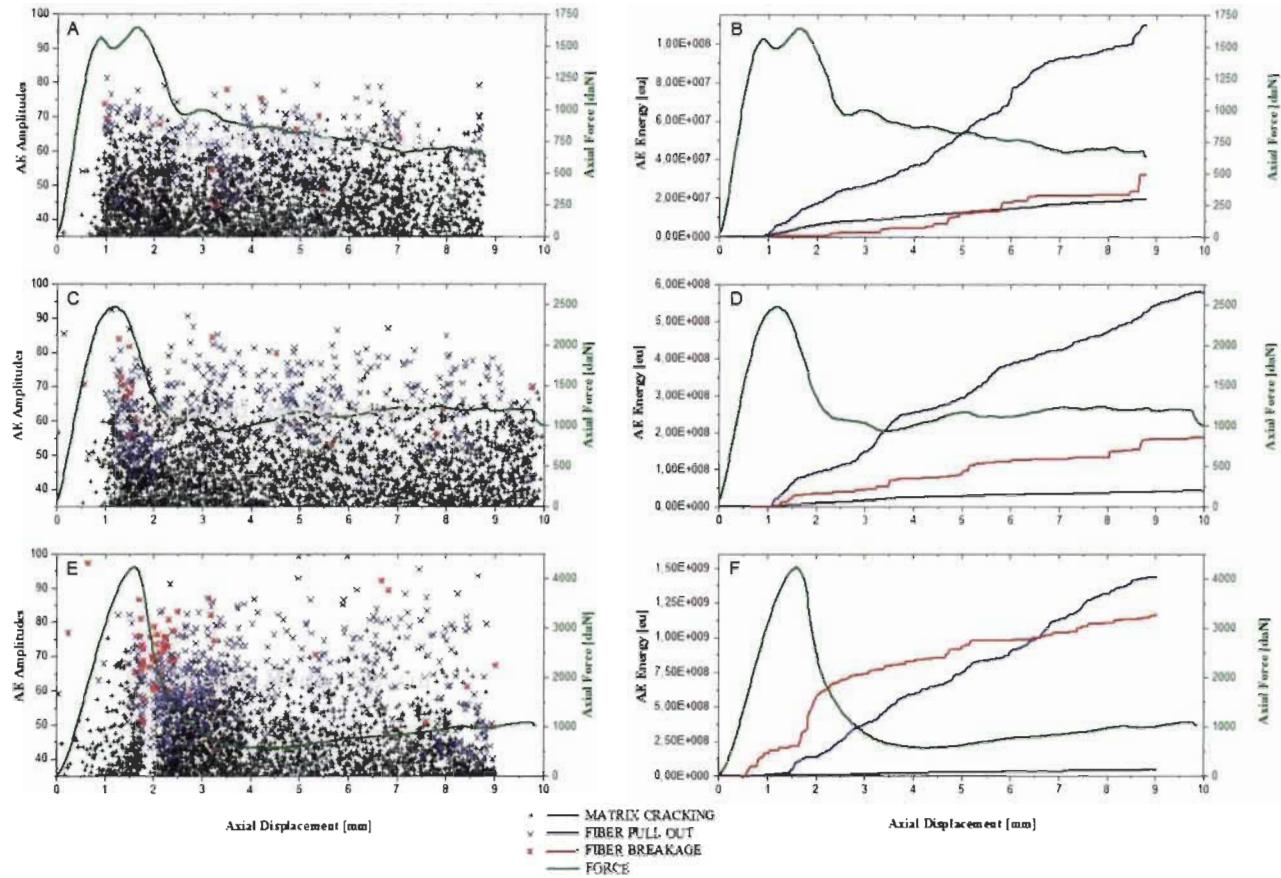


Figure 4.4: amplitude d'évènements et énergie acoustique cumulative de l'essai de compression : A-B) NA100; C-D) NA150 et E-F) NA200.

Les courbes de droite de la figure 4.4 illustrent pour leur part l'énergie acoustique cumulée pour chaque mode de dommage. Pour le NA100, la fissuration de la matrice et la rupture de la fibre montrent des valeurs d'énergie cumulative similaires, tandis que l'énergie du mode d'arrachement de la fibre est beaucoup plus importante. En augmentant la densité surfacique de 100 à 150 et 200 g / m<sup>2</sup>, l'énergie cumulée pour le mode de rupture des fibres augmente par rapport à celle de la fissuration de la matrice, jusqu'à ce qu'elle se rapproche de celle de l'arrachement de la fibre pour le NA200. Cela est déjà expliqué avec les courbes

de gauches : l'augmentation de la densité de surface du composite augmente la densité des événements liés à l'arrachement et à la rupture des fibres.

#### 4.1.2.3 Contribution de chaque mode d'endommagement

Alencar et al. [76] et Habibi et al. [51] ont défini la contribution de chaque mode d'endommagement comme le rapport de l'énergie acoustique cumulative d'un mode donné sur l'énergie cumulative totale du composite :

$$DC_i = \frac{E_i}{E_T} = \frac{E_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad \text{Équation 4.1}$$

Avec :

$DC_i$  : contribution de dommage pour le  $i^{\text{ème}}$  mode,  $i = 1 \text{ à } n$

$E_i$  : Énergie cumulative de l'EA pour le  $i^{\text{ème}}$  mode,  $i = 1 \text{ à } n$

$\sum_{i=1}^n E_i$  : Énergie cumulative de l'EA pour tous les modes

Le diagramme à barres de la figure 4.5 montre la contribution de chaque mode de dommage (en pourcentage) pour les trois densités surfaciques de noyaux. Le pourcentage DC est calculé pour chaque mode et l'écart type est calculé à partir de la valeur moyenne de trois échantillons testés pour chaque type de noyau. Selon cette étude, les deuxièmes et troisièmes modes sont les plus importants. Pour les échantillons NA200, on peut constater que la contribution des deux derniers modes est presque la même (49% et 52% respectivement pour l'arrachement de la fibre et la rupture de la fibre).

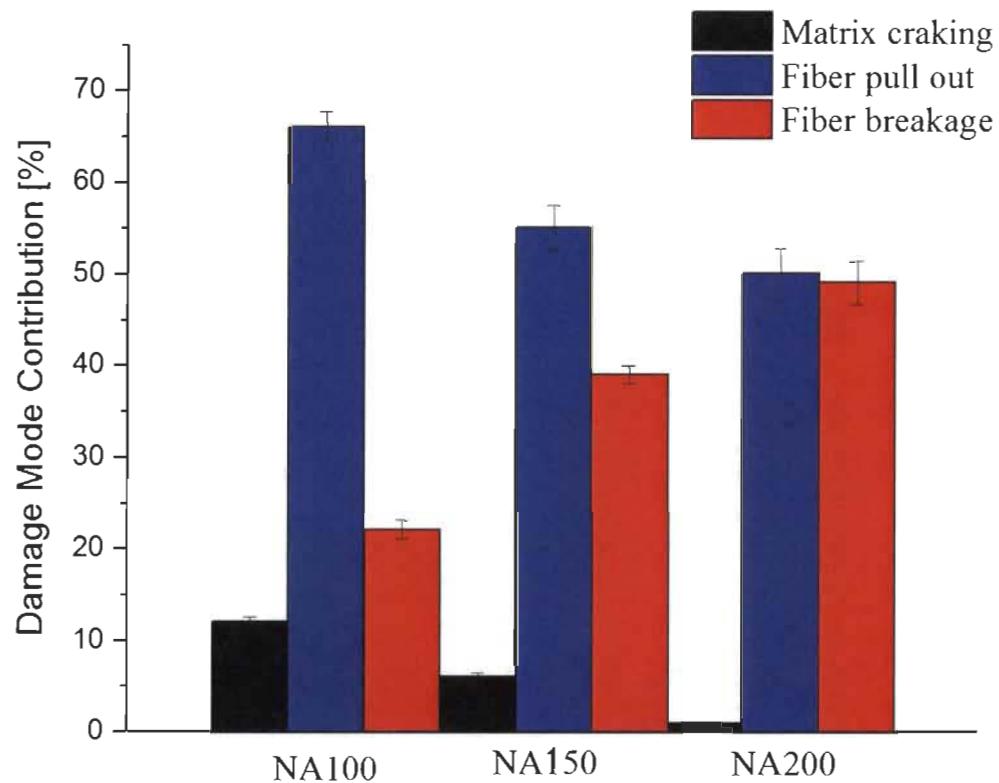


Figure 4.5: Indice de contribution pour chaque mode d'endommagement pour les différents échantillons de noyau soumis à la compression

## 4.2 Essai de flexion

### 4.2.1 Caractérisation mécanique

Les tests ont tous été réalisés sur des sandwichs en nid d'abeille en fibres courtes de lin ayant les mêmes dimensions nominales. Dans les sections qui suivent les divers échantillons sont identifiés comme suit : NA100x2 veut dire un échantillon avec âme de  $100\text{g}/\text{m}^2$  avec

des peaux de deux couches, NA200x4 veut dire un échantillon avec âme de  $200\text{g/m}^2$  avec des peaux de quatre couches, et ainsi de suite.

Les parties supérieures et inférieures de la peau du sandwich sont sollicitées respectivement en compression et en traction (Figure 4.6).

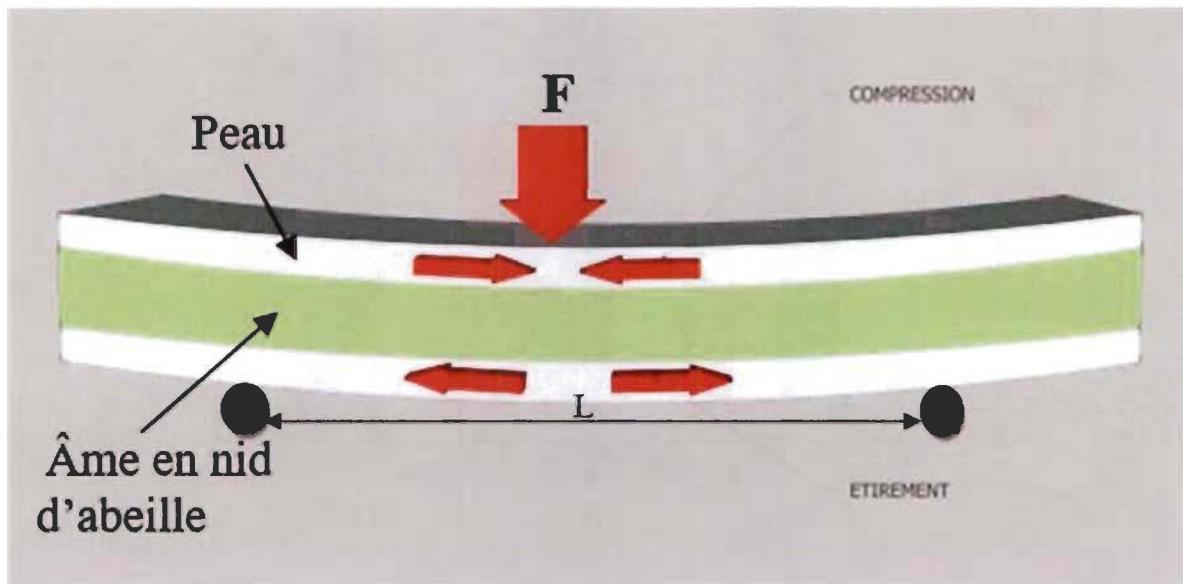


Figure 4.6 : Schéma de l'essai de flexion

Pour les trois densités d'âmes testées, les figures 4.7, 4.8 et 4.9 montrent que la force augmente en fonction du déplacement jusqu'à un premier maximum très tôt durant l'essai. Ce phénomène est expliqué par la rupture de l'âme, suite à quoi la force chute puis recommence à s'accroître. C'est à ce moment que les peaux prennent la relève et aident à supporter la charge grandissante jusqu'à la rupture totale. On constate alors que les épaisseurs plus grandes des peaux supportent des forces plus grandes. On remarque aussi que la force

s'accroît et s'affaisse à de nombreuses reprises jusqu'à la fin du test, ce qui démontre une détérioration complexe du système peaux-adhésifs-âme.

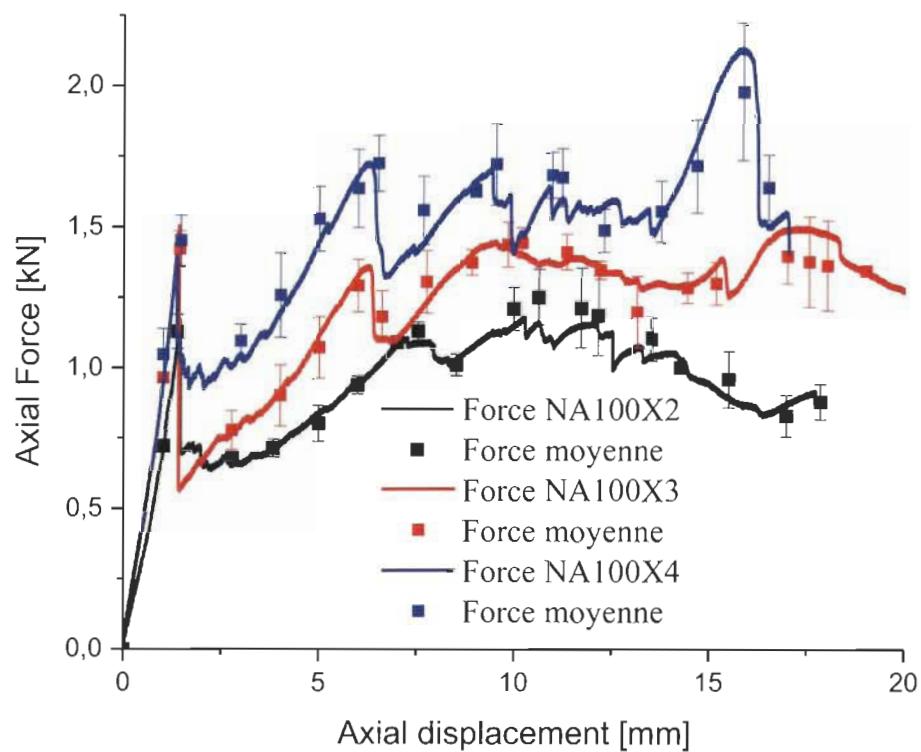


Figure 4.7 : Courbe de flexion des sandwichs NA100 avec différentes épaisseurs de peaux

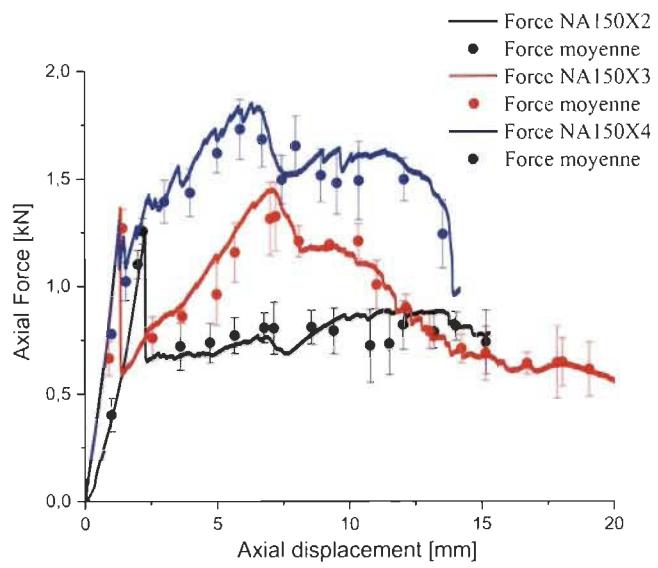


Figure 4.8 : Courbe de flexion des sandwichs NA150 avec différentes épaisseurs de peaux

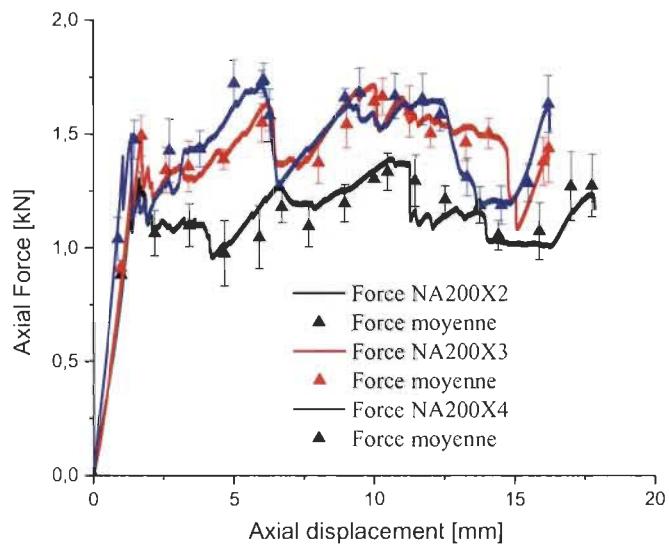


Figure 4.9 : Courbe de flexion des sandwichs NA200 avec différentes épaisseurs de peaux

Les divers essais de flexion 3 points ont permis d'obtenir les propriétés mécaniques présentées dans le tableau 4.4, suivant la norme ASTM C393 [77].

Tableau 4.4 : Les propriétés mécaniques des composites sandwichs en flexion

<b>Échantillons</b>	<b>F KN</b>	<b>Ecart Type</b>	<b><math>\sigma</math> Mpa</b>	<b>Ecart Type</b>	<b><math>\tau_{ult}</math> Mpa</b>	<b>Ecart Type</b>
NA100x2	1,1822	0,2613	8,2564	1,8090	0,3230	0,0620
NA100x3	1,5099	0,1721	6,7877	1,0270	0,4050	0,0440
NA100x4	2,1316	0,0718	7,4906	0,2250	0,4870	0,0150
NA150x2	1,7697	0,1177	12,2011	0,7560	0,4350	0,0250
NA150x3	1,4549	0,1453	6,6927	0,6610	0,3110	0,0310
NA150x4	1,8531	0,1687	6,6561	0,0454	0,5360	0,0170
NA200x2	1,3963	0,0514	9,4751	0,3403	0,3290	0,0170
NA200x3	1,7165	0,0759	7,7790	0,3700	0,3820	0,0150
NA200x4	1,7202	0,2693	5,3903	0,5080	0,4470	0,0140

## 4.2.2 Émission acoustique

### 4.2.2.1 Énergie cumulative

La figure 4.10 reprend les courbes des forces axiales du NA100 (figure 4.7) auxquelles sont ajoutées les courbes de l'énergie cumulative. Pour les 3 épaisseurs, l'énergie augmente rapidement en pente presque verticale aux alentours d'un déplacement de 1 mm. Cette augmentation de l'énergie acoustique correspond clairement à la rupture de l'âme en début d'essai.

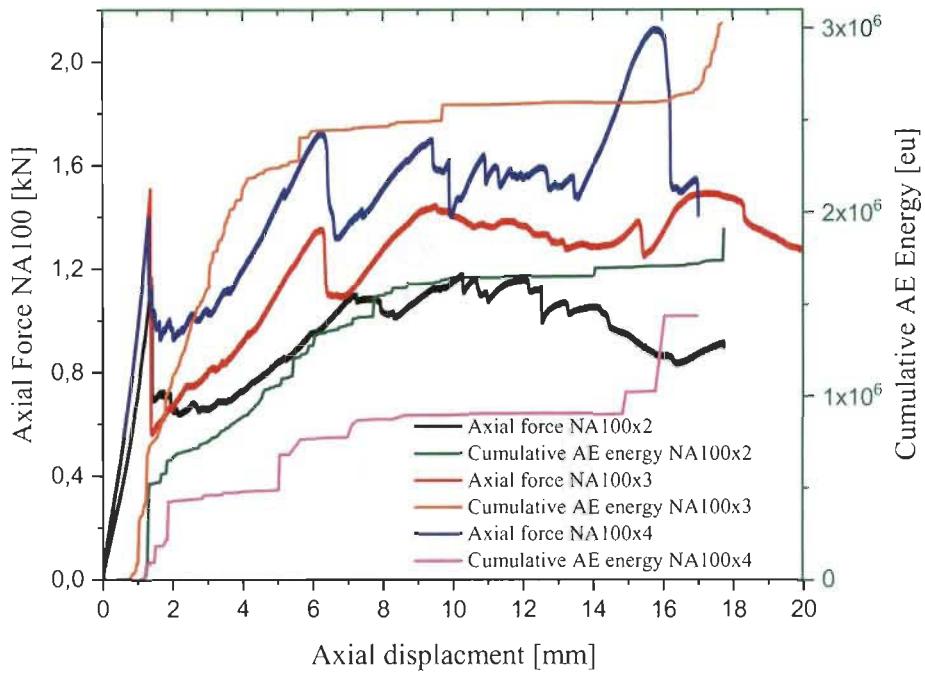


Figure 4.10 : Courbe de la force en flexion et énergie cumulative du NA100 pour les trois épaisseurs testées

Pour NA100, l'énergie cumulative du 2 couches est inférieure celle du 3 couches mais l'énergie du 4 couches est la plus faible. Cette tendance est la même pour NA200 (Figure 4.12). Pour NA150 l'énergie cumulative du 4 couches est comprise entre celle des 2 et 3 couches (Figure 4.11). Cette non-linéarité entre le nombre de couches des peaux et l'énergie cumulative des noyaux est très intéressante et elle mérite investigation dans des travaux futurs. Il faudrait aussi vérifier s'il ne s'agit pas là d'une distorsion purement expérimentale : comme les capteurs acoustiques sont positionnés pour enregistrer les endommagements de l'âme, ces derniers captent peut-être moins d'évènements pour des peaux plus épaisses. Quoi

qu'il en soit, pour tous les échantillons testés, l'énergie cumulative est toujours plus importante pour l'épaisseur 3 couches.

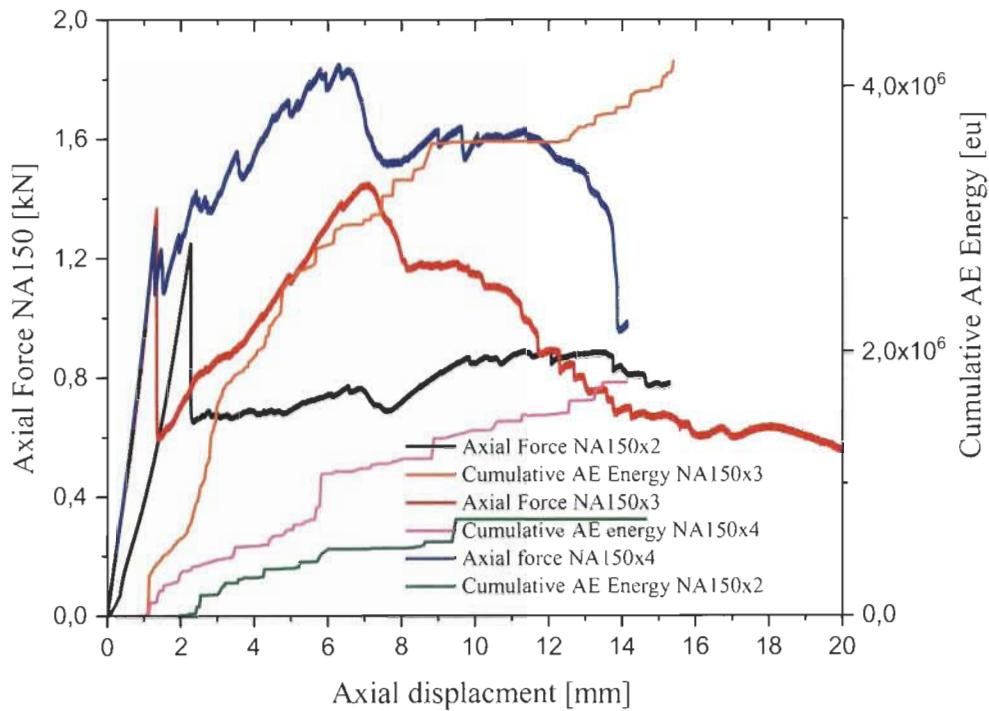


Figure 4.11 : Courbe de la force en flexion et énergie cumulative du NA150 pour les trois épaisseurs testées

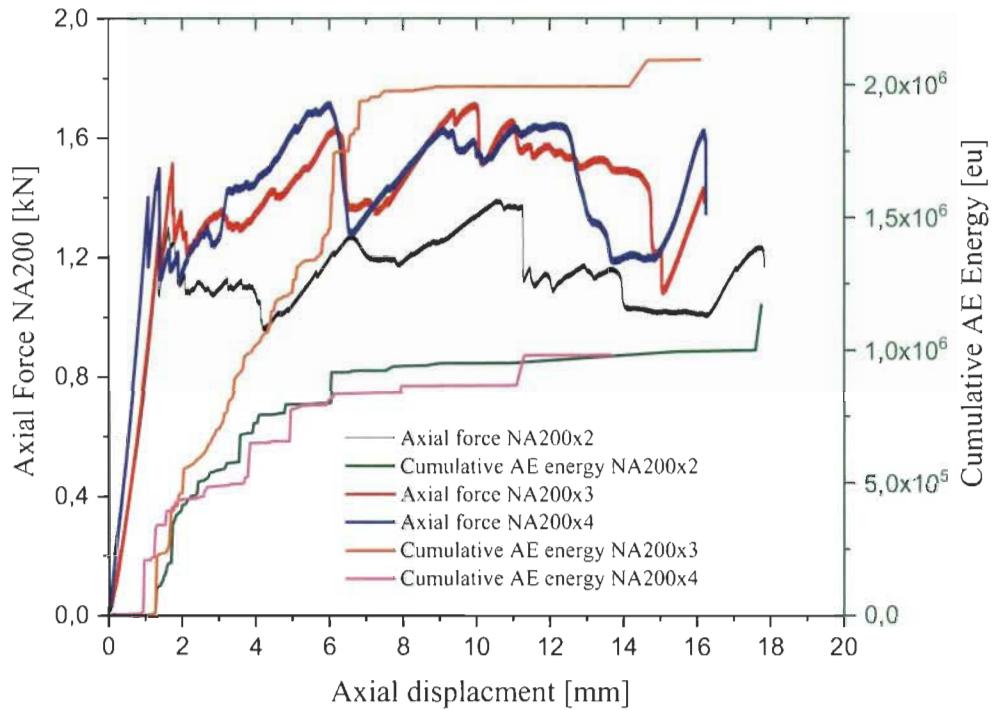


Figure 4.12 : Courbe de la force en flexion et énergie cumulative du NA200 pour les trois épaisseurs testées

#### 4.2.2.2 Classification des événements acoustiques et des modes d'endommagement

La Figure 4.13 montre les résultats des sandwichs avec âme NA100 pour les 3 épaisseurs de peaux : les Figures 4.13 A-B montrent les résultats du NA100x2, Figures 4.13 C-D les résultats du NA100x3, et les Figures 4.13 E-F les résultats du NA100x4. Les amplitudes des événements acoustiques sont indiquées à gauche (A, C et E), tandis que les courbes force-déplacement corrélées aux courbes d'énergie cumulative de chaque mode de dommage sont indiquées à droite (B, D et F). Encore ici différentes couleurs et symboles sont

utilisés pour différencier les modes d'endommagement et leurs énergies cumulatives. Des courbes similaires sont utilisées pour les résultats du NA150 et NA200 aux figures 4.14 et 4.15.

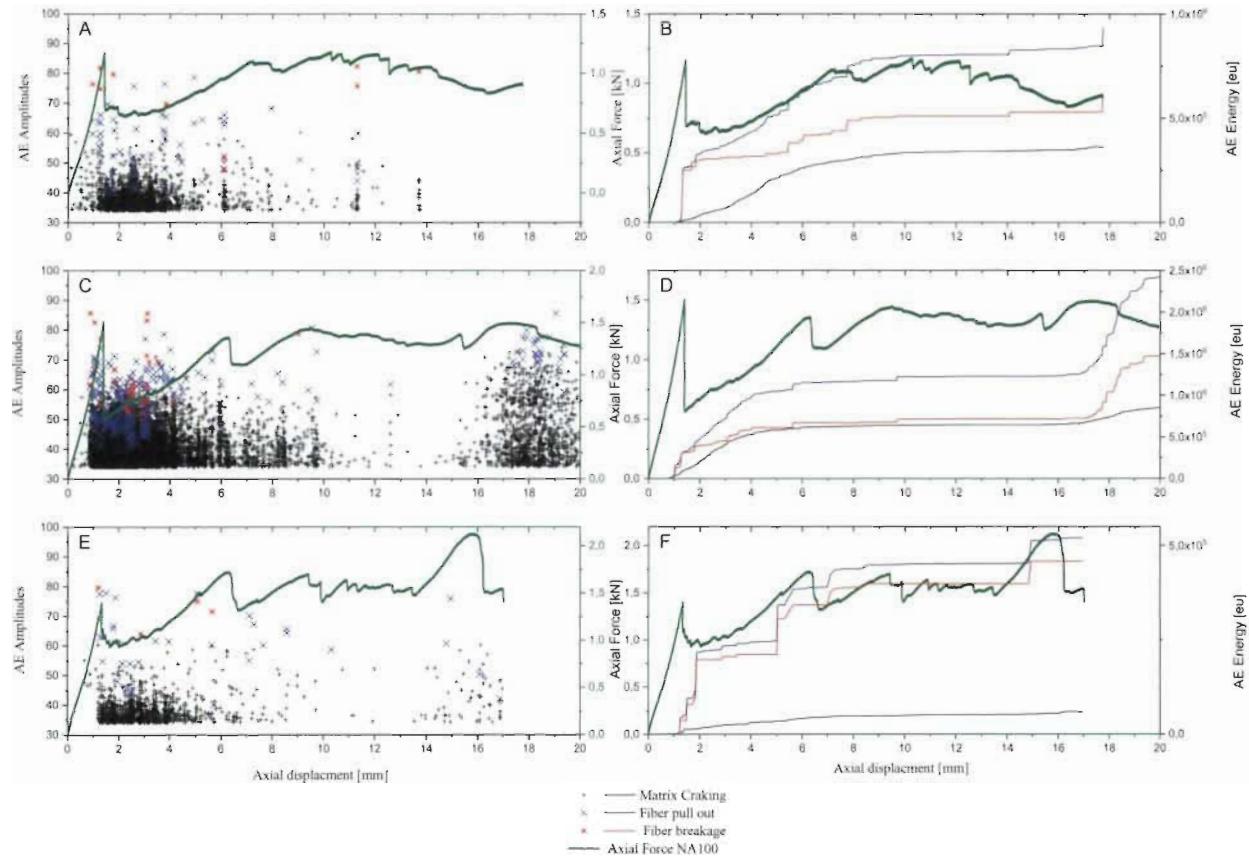


Figure 4.13 : amplitude des événements et énergie acoustique cumulative de l'essai de flexion : A-B) NA100x2; C-D) NA100x3 et E-F) NA100x4.

Pour ce qui est du NA100, pour les trois épaisseurs de peaux, on remarque que les événements acoustiques commencent à 1 mm de déplacement (Figure 4.13 A-C-E). De façon similaire, les modes de dommage commencent en même temps (Figure 4.13 B-D-F). Le

premier mode (rupture de la matrice) est le plus dense des 3 modes. Mais en termes d'énergie, pour les 3 épaisseurs, l'énergie cumulative du premier mode (fissuration de la matrice) est la plus faible.

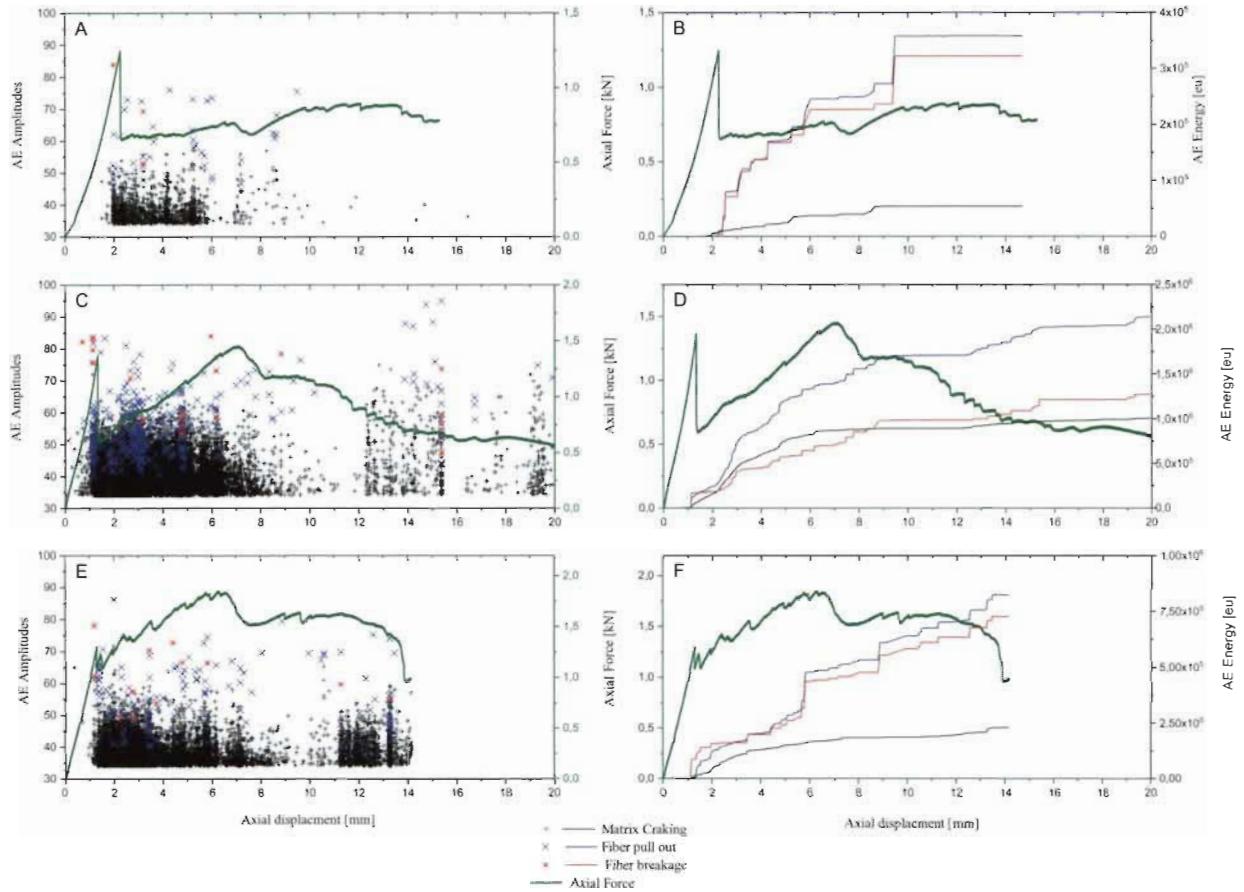


Figure 4.14 : amplitude des évènements et énergie acoustique cumulative de l'essai de flexion : A-B) NA150x2; C-D) NA150x3 et E-F) NA150x4.

Pour le NA150x2, l'énergie apparaît plus tard à un déplacement de 2 mm. Pour le NA150x3 et Na150x4 elle commence à 1mm. On remarque que dans les Figures 4.14-B et

4.14-F, l'énergie de la rupture matricielle est beaucoup plus faible que celles des deux autres modes. Mais l'énergie cumulative du NA150x2 est presque 3 fois plus importante que celle du NA150x4. Pour le NA150x3, l'énergie de la rupture de la matrice est très proche de celle de la rupture de la fibre, tandis que l'énergie d'arrachement de la fibre est presque le double de l'énergie des deux autres modes de dommage.

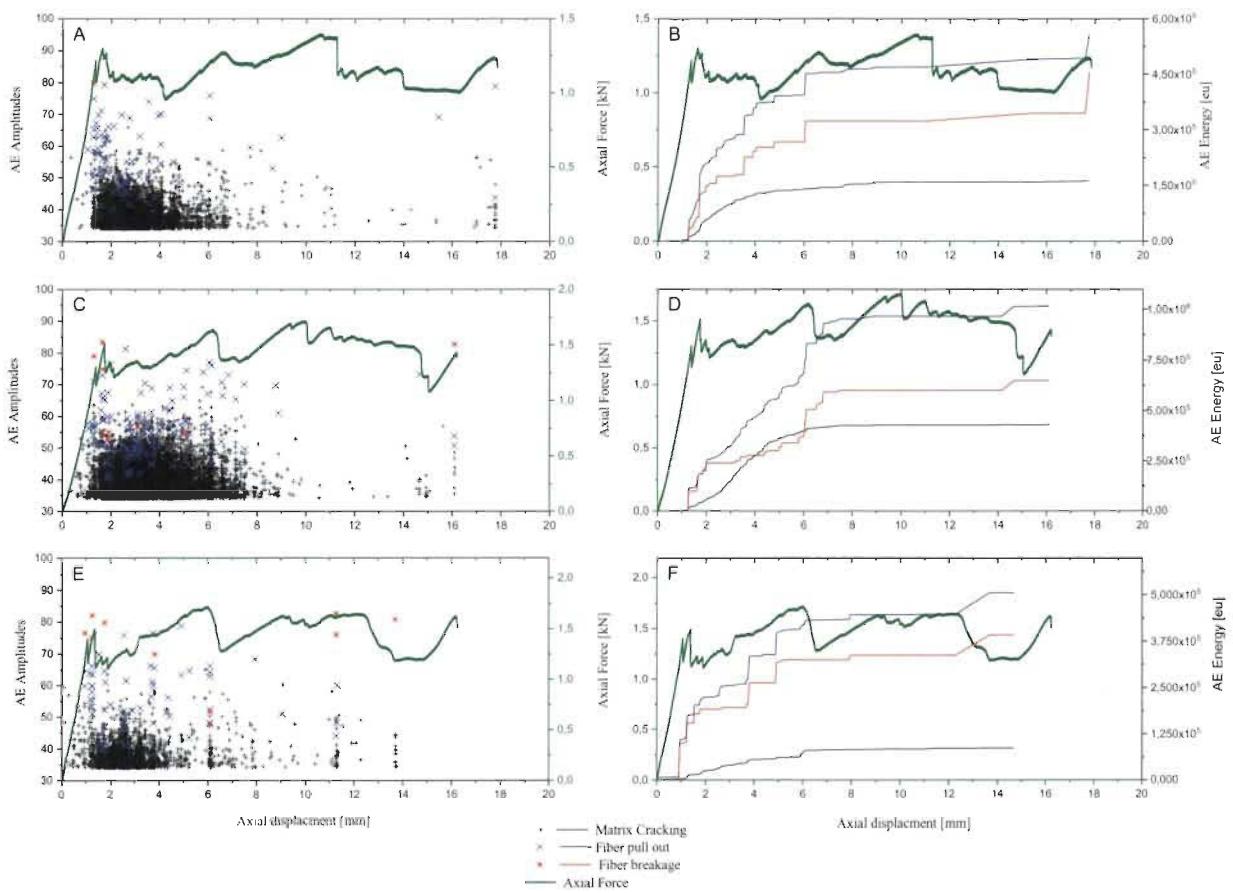


Figure 4.15: amplitude des événements et énergie acoustique cumulative de l'essai de flexion : A-B) NA200x2; C-D) NA200x3 et E-F) NA200x4.

Finalement, pour les sandwichs ayant une âme de 200 g/m<sup>2</sup>, l'énergie cumulative pour les 3 modes de dommage commence à 1mm pour NA200x2 et NA200x3. Mais pour le quatre couches, l'énergie commence à un déplacement d'environ 0.5mm avec une faible amplitude et augmente d'une pente verticale à 1 mm de déplacement. Contrairement aux résultats des deux autres densités d'âme, l'énergie acoustique cumulative du premier mode d'endommagement, rupture de la matrice, a ici la valeur la plus faible. Viennent ensuite la rupture des fibres l'arrachement des fibres. Ce dernier mode est presque le même pour NA200x2 et NA200x4 mais il double pour NA200x3.

#### 4.2.2.3 Contribution des modes d'endommagement

Le diagramme à barres illustrées à la figure 4.16 montre la contribution de chaque mode d'endommagement durant le test de flexion des sandwichs. On remarque que le premier mode de dommage, la rupture de la matrice, contribue à plus de 85% pour tous les échantillons. DC ne dépasse pas 10% pour les deux autres modes qui sont l'arrachement des fibres et la rupture des fibres.

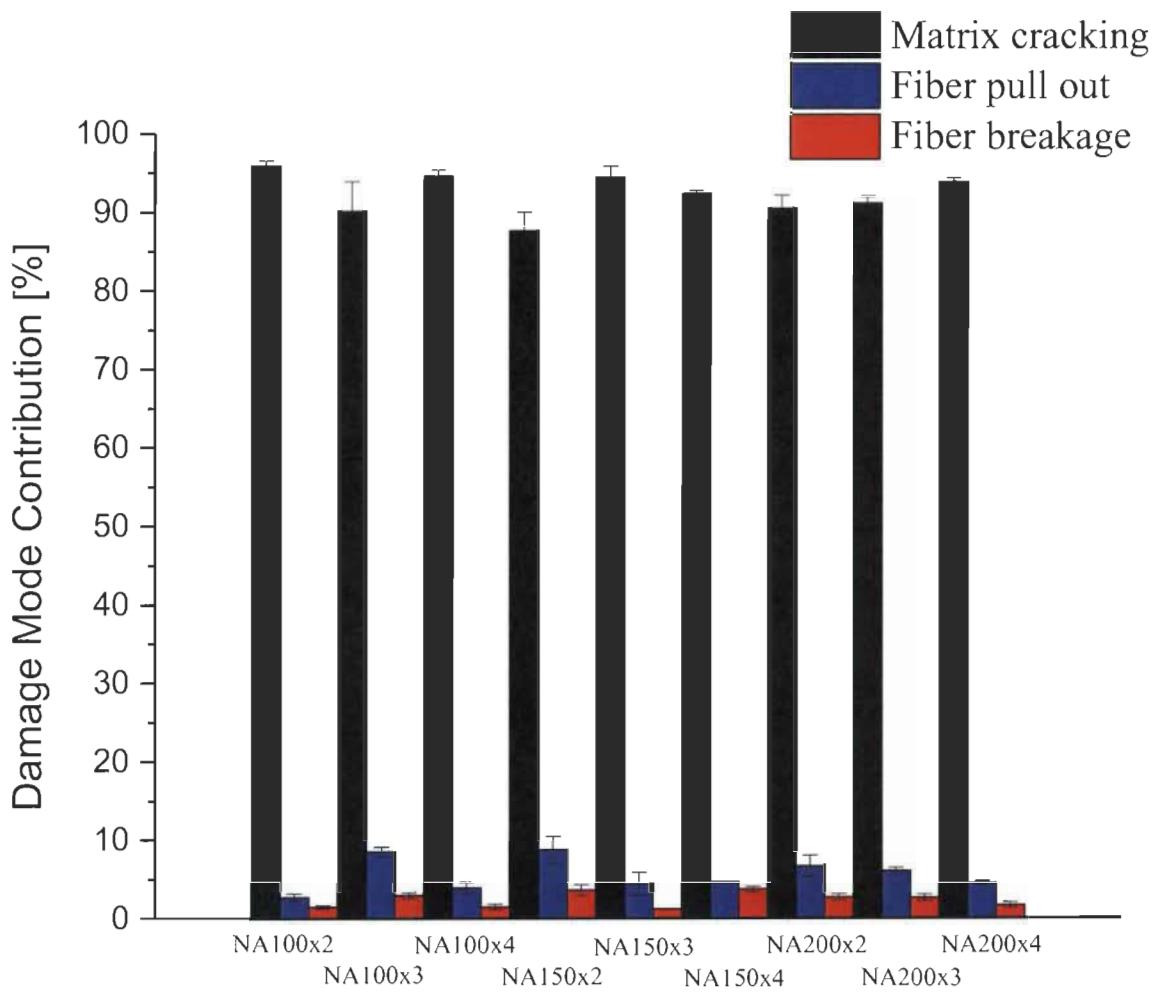


Figure 4.16 : Indice de contribution pour chaque mode d'endommagement pour les différents échantillons testés en flexion

#### 4.3 Exemple d'utilisation du logiciel d'optimisation

Le tableau 4.5 présente des résultats de l'exécution d'un programme Matlab qui utilise les données des tests de compression et de flexion dans un modèle de réseau de neurones. Ce modèle alimente une fonction objective permettant une optimisation par algorithme génétique dont le but est de trouver la conception optimale d'un sandwich nid d'abeille

répondant le mieux aux exigences de service (Figure 3.13). On rappelle ici la fonction objective :

$$\min Y = w_1|c_1 - y_1| + w_2|c_2 - y_2| + w_3y_3 \quad \text{Équation 4.2}$$

Avec

$c_i$  : consigne normalisée introduite par l'utilisateur pour la compression ( $c_1$ ) et la flexion ( $c_2$ )

$y_i$  : valeur normalisée prédictive par le modèle pour la compression ( $y_1$ ), la flexion ( $y_2$ ) et le coût ( $y_3$ )

$w_i$  : poids relatif donné à l'une des trois variables à optimiser

Tableau 4.5: Quelques résultats de simulation pour le programme d'optimisation

w1	w2	w3	c1	c2	Nbre de couches des peaux	Densité surfacique du noyau
1	0	0	1	0	S/O	200,0000
0	1	0	0	1	4,0000	S/O
0	0	1	0	0	2,0000	118,0817
0,25	0,25	0,5	1	1	2,0000	148,4060

La première simulation vise à trouver le meilleur noyau pour une contrainte en compression la plus élevée. Puisque le poids  $w_2$  qui multiplie le nombre de couche est nul, cette valeur est ici non pertinente. La consigne  $c_1$  est fixée à 1, ce qui correspond à la valeur maximale de  $\sigma$  au tableau 4.1. On remarque alors que, sans surprise, l'algorithme converge vers le noyau le plus dense ( $200 \text{ g/m}^2$ ).

Pour la deuxième simulation, on vise à obtenir un composite avec les meilleures propriétés en flexion. Cette fois-ci, c'est le poids  $w_1$  qui multiplie la densité de noyau qui est nul, cette valeur est donc non pertinente. La consigne  $c_2$  est fixée à 1, ce qui correspond à la valeur maxime de  $\tau_{ult}$  au tableau 4.4. On constate que le programme converge correctement vers le nombre de couches le plus élevé, soit 4.

Dans la troisième simulation on recherche le matériau le moins cher, peu importe les propriétés mécaniques. Dans ce cas on arrive correctement au sandwich ayant le moins de fibres (peaux 2 couches et noyau près de  $100 \text{ g/m}^2$ ).

Finalement, la dernière simulation recherche un matériau dont le coût a le double d'importance que les 2 propriétés mécanique (compression et flexion). L'algorithme converge vers des peaux de 2 couches (moins de fibres) et une densité d'âme de  $148,4060 \text{ g/m}^2$  (pour maintenir des propriétés de compression et de flexion).

# **Chapitre 5 - Conclusions**

## **5.1 Résultats importants en égard des objectifs**

Rappelons ici les deux objectifs de cette recherche :

- I. Mieux comprendre le comportement mécanique en compression et en flexion des composites nids d'abeilles dont l'âme est également en fibres naturelles de lin, en tenant compte de divers paramètres des âmes et des peaux.
- II. Optimiser les paramètres d'un composite nid d'abeille en fibres naturelles de lin afin d'améliorer ses performances pour une application donnée.

### **5.1.1 Procédé de fabrication et assemblage des âmes et des peaux**

Dans ce travail, des noyaux de fibres courtes de lin ayant trois densités surfacique (100 g / m<sup>2</sup>, 150 g / m<sup>2</sup> et 200 g / m<sup>2</sup>) ont été testés. Un procédé de fabrication en milieu humide a été utilisé pour obtenir les renforts (peaux et âmes planaires). Un moule de compression a été conçu pour former les âmes planes pré-imprégnées thermodurcissables en forme de nid d'abeilles. Le sandwich final est constitué à 100% en fibres naturelles de lin (peaux et âme), ce qui constitue une innovation dans ce travail.

### 5.1.2 Résultats importants sur la compression des noyaux

Il a été observé que l'augmentation de la densité surfacique des noyaux entraîne une augmentation des propriétés mécaniques en compression. L'analyse par ÉA a aussi montré que les deux modes d'endommagement (fissuration matricielle et arrachement de la fibre) sont beaucoup plus denses que le troisième (rupture de la fibre) pour tous les échantillons testés. Des fissures matricielles apparaissent pendant toute la durée du test. Les échantillons étant constitués de fibres courtes non orientées, les fissures se propagent de manière arbitraire et conduisent à une séparation fibres / matrice en raison de la faiblesse de leur interface.

Le troisième mode de dégradation (rupture de la fibre) augmente avec la densité surfacique. Selon notre étude, ce mode de dégradation est prédominant dans la défaillance des échantillons NA200. En effet, la concentration de ce mécanisme de dommage est localisée dans la même zone où la force diminue après le pic. Un matériau qui perd sa résistance à cause de ce mécanisme est beaucoup plus fort.

### 5.1.3 Résultats importants sur la flexion 3 points des sandwichs.

Les essais de flexion ont été réalisés avec des âmes ayant trois densités différentes ( $100 \text{ g/m}^2$ ,  $150 \text{ g/m}^2$  et  $200 \text{ g/m}^2$ ) et des peaux de trois épaisseurs différentes (2, 3 et 4 couches ayant toutes un  $V_f=40\%$ ). Il a été observé que l'augmentation de la densité de l'âme n'a pas un effet très important sur la charge maximale que le sandwich peut supporter. Par contre l'augmentation de l'épaisseur des peaux a un effet prédominant dans l'essai de flexion car

ces dernières résistent à la charge avant de la transmettre à l'âme. De plus, après la rupture de l'âme, les peaux prennent la relève jusqu'à la rupture finale du sandwich.

Le premier mode d'endommagement, rupture matricielle, est dominant pour les 9 échantillons testés en flexion. Les courbes de forces corrélées avec les événements acoustiques montrent cette dominance, avec un DC qui dépasse les 85% pour ce mode. L'endommagement en flexion est donc considérablement différent de celui en compression, ce qui supporte l'objectif de mieux comprendre les divers mécanismes de chaque mode de chargement pour pouvoir optimiser le matériau selon sa fonction.

## 5.2 Travaux futurs

Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser les noyaux développés. Plus particulièrement une variation de la géométrie de la cellule du noyau ou de ses dimensions ainsi que la méthode de fabrication des noyaux sont parmi les points qui pourront être développés et étudiés dans le futur.

D'autre part, un essai de fatigue est fortement recommandé pour déterminer les caractéristiques du nouveau composite et déterminer son comportement dans des conditions d'utilisations réelles. D'autres essais tels que l'indentation et l'impact sont également indispensables pour caractériser les structures sandwichs qui sont souvent appelées à subir des chocs (planchers, panneaux structuraux, etc).

Finalement, d'autres tests faisant utilisation de fibres longues tant pour les peaux que les noyaux, pourraient être effectués pour quantifier l'augmentation potentielle des propriétés des composites sandwich.

## Bibliographie

1. Dittenber, D.B. and H.V.S. GangaRao, *Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012. **43**(8): p. 1419-1429.
2. Koronis, G., A. Silva, and M. Fontul, *Green composites: A review of adequate materials for automotive applications*. Composites Part B: Engineering, 2013. **44**(1): p. 120-127.
3. Yan, L., N. Chouw, and K. Jayaraman, *Flax fibre and its composites – A review*. Composites Part B: Engineering, 2014. **56**: p. 296-317.
4. La Mantia, F.P. and M. Morreale, *Green composites: A brief review*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011. **42**(6): p. 579-588.
5. Dicker, M.P.M., et al., *Green composites: A review of material attributes and complementary applications*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014. **56**: p. 280-289.
6. Pil, L., et al., *Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites?* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016. **83**: p. 193-205.
7. Liang, S., P.-B. Gning, and L. Guillaumat, *Properties evolution of flax/epoxy composites under fatigue loading*. International Journal of Fatigue, 2014. **63**: p. 36-45.
8. Malek, S. and L. Gibson, *Effective elastic properties of periodic hexagonal honeycombs*. Mechanics of Materials, 2015. **91, Part 1**: p. 226-240.
9. Wang, H., K.R. Ramakrishnan, and K. Shankar, *Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores*. Materials & Design, 2016. **99**: p. 68-82.
10. Zhang, Q., et al., *Bioinspired engineering of honeycomb structure – Using nature to inspire human innovation*. Progress in Materials Science, 2015. **74**: p. 332-400.
11. Belingardi, G., P. Martella, and L. Peroni, *Fatigue analysis of honeycomb-composite sandwich beams*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(4): p. 1183-1191.
12. Giglio, M., A. Manes, and A. Gilioli, *Investigations on sandwich core properties through an experimental–numerical approach*. Composites Part B: Engineering, 2012. **43**(2): p. 361-374.
13. Roy, R., et al., *Characterization of Nomex honeycomb core constituent material mechanical properties*. Composite Structures, 2014. **117**: p. 255-266.

14. Petrone, G., et al., *Initial experimental investigations on natural fibre reinforced honeycomb core panels*. Composites Part B: Engineering, 2013. **55**: p. 400-406.
15. Zuhri, M.Y.M., Z.W. Guan, and W.J. Cantwell, *The mechanical properties of natural fibre based honeycomb core materials*. Composites Part B: Engineering, 2014. **58**: p. 1-9.
16. Sikdar, S., W. Ostachowicz, and J. Pal, *Damage-induced Acoustic Emission Source Identification in an Advanced Sandwich Composite Structure*. Composite Structures, 2018.
17. Monti, A., et al., *Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016. **90**: p. 100-110.
18. Yang, Y., et al., *Acoustic properties of glass fiber assembly-filled honeycomb sandwich panels*. Composites Part B: Engineering, 2016. **96**: p. 281-286.
19. Brigante, D., *New composite materials*. 2014: Springer.
20. Havriliak, S. and S.J. Havriliak, *Dielectric and mechanical relaxation in materials: analysis, interpretation and application to polymers*. 1997: Hanser.
21. Joshi, S.V., et al., *Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?* Composites Part A: Applied science and manufacturing, 2004. **35**(3): p. 371-376.
22. Wertz, J.-L., *Les biocompositess et composites polymeere-chanvre en particulier*. Unite de Chimie biologique industrielle, Universite de Liege–Gembloux Agro-Bio Tech, 2014.
23. Hoa, S.V., *Principles of the manufacturing of composite materials*. 2009: DEStech Publications, Inc.
24. Boopalan, M., M. Niranjanaa, and M. Umapathy, *Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites*. Composites Part B: Engineering, 2013. **51**: p. 54-57.
25. Saidane, E.H., et al., *Mode-I interlaminar fracture toughness of flax, glass and hybrid flax-glass fibre woven composites: Failure mechanism evaluation using acoustic emission analysis*. Polymer Testing, 2019.
26. Karray, M., *Caractérisation des propriétés mécaniques et électriques des matériaux composites par méthode holographique numérique 3D et analyse diélectrique*. 2012, Université du Maine; FACULTE DES SCIENCES DE SFAX.
27. Zampaloni, M., et al., *Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: a discussion on manufacturing problems and solutions*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(6): p. 1569-1580.

28. BALEY, C., *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. 2005: Ed. Techniques Ingénieur.
29. BOUHANK, S., *Elaboration de matériaux composites PVC/fibres de Genêt d'Espagne: Formulations et caractérisations*. 2017.
30. Toupe, J.L., *Optimisation des propriétés mécaniques de composites à base de fibres naturelles: application à un composite de fibre de lin avec un mélange de polyéthylène/polypropylène d'origine post-consommation*. 2015, Université Laval.
31. Smock, D., *Wood-Plastic Composites: Technologies and Global Markets*. PLS034B, BCC Research, 2011.
32. Al-Oqla, F.M. and S. Sapuan, *Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry*. Journal of Cleaner Production, 2014. **66**: p. 347-354.
33. Leao, A.L., R. Rowell, and N. Tavares, *Applications of natural fibers in automotive industry in Brazil—thermoforming process*, in *Science and technology of polymers and advanced materials*. 1998, Springer. p. 755-761.
34. Summerscales, J., et al., *A review of bast fibres and their composites. Part 2–Composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010. **41**(10): p. 1336-1344.
35. Faruk, O., et al., *Progress report on natural fiber reinforced composites*. Macromolecular Materials and Engineering, 2014. **299**(1): p. 9-26.
36. Shah, D.U., et al., *Hydroxyethylcellulose surface treatment of natural fibres: the new 'twist'in yarn preparation and optimization for composites applicability*. Journal of Materials Science, 2012. **47**(6): p. 2700-2711.
37. Habibi, M., *Développement et caractérisation de nouveaux composites hybrides UD LIN/papier et UD LIN/MAT LIN*. 2016, Université du Québec à Trois-Rivières.
38. Ashby, M., *The CES EduPack database of natural and man-made materials*. Cambridge, UK: Cambridge University and Granta Design, 2008.
39. Ash, B.J., et al., *Mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/polymethylmethacrylate nanocomposites*. Polymer Composites, 2002. **23**(6): p. 1014-1025.
40. Liu, Q. and M. Hughes, *The fracture behaviour and toughness of woven flax fibre reinforced epoxy composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008. **39**(10): p. 1644-1652.
41. Le Duigou, A., et al., *Interfacial properties of flax fibre–epoxy resin systems: existence of a complex interphase*. Composites Science and Technology, 2014. **100**: p. 152-157.

42. Liang, S., P.-B. Gning, and L. Guillaumat, *A comparative study of fatigue behaviour of flax/epoxy and glass/epoxy composites*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(5): p. 535-543.
43. Yan, L., N. Chouw, and K. Jayaraman, *Flax fibre and its composites—a review*. Composites Part B: Engineering, 2014. **56**: p. 296-317.
44. Cuinat-Guerraz, N., M.-J. Dumont, and P. Hubert, *Environmental resistance of flax/bio-based epoxy and flax/polyurethane composites manufactured by resin transfer moulding*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016. **88**: p. 140-147.
45. Oksman, K., *High quality flax fibre composites manufactured by the resin transfer moulding process*. Journal of reinforced plastics and composites, 2001. **20**(7): p. 621-627.
46. Van de Weyenberg, I., et al., *Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites*. Composites Science and Technology, 2003. **63**(9): p. 1241-1246.
47. Hughes, M., J. Carpenter, and C. Hill, *Deformation and fracture behaviour of flax fibre reinforced thermosetting polymer matrix composites*. Journal of Materials Science, 2007. **42**(7): p. 2499-2511.
48. Phillips, S., et al., *Characterization of flax/epoxy prepgs before and after cure*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2013. **32**(11): p. 777-785.
49. Mittal, V., R. Saini, and S. Sinha, *Natural fiber-mediated epoxy composites—a review*. Composites Part B: Engineering, 2016. **99**: p. 425-435.
50. Shah, D.U., P.J. Schubel, and M.J. Clifford, *Modelling the effect of yarn twist on the tensile strength of unidirectional plant fibre yarn composites*. Journal of Composite Materials, 2013. **47**(4): p. 425-436.
51. Habibi, M., et al., *Combining short flax fiber mats and unidirectional flax yarns for composite applications: effect of short flax fibers on biaxial mechanical properties and damage behaviour*. Composites Part B: Engineering, 2017. **123**: p. 165-178.
52. Rodríguez, E., et al., *Characterization of composites based on natural and glass fibers obtained by vacuum infusion*. Journal of composite materials, 2005. **39**(3): p. 265-282.
53. George, J. and J.I. Verpoest, *Mechanical properties of flax fibre reinforced epoxy composites*. Die Angewandte Makromolekulare Chemie, 1999. **272**(1): p. 41-45.
54. Goutianos, S., et al., *Development of flax fibre based textile reinforcements for composite applications*. Applied Composite Materials, 2006. **13**(4): p. 199-215.

55. Beckwith, S., *Natural Fiber Reinforcement Materials Lower Cost Technology for Composites Applications*. Composites fabrication, 2003. **19**(11): p. 12-16.
56. Baets, J., et al., *Determination of the optimal flax fibre preparation for use in UD flax-epoxy composites*. 2011.
57. Van de Weyenberg, I., et al., *Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fibre treatment*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006. **37**(9): p. 1368-1376.
58. Coroller, G., et al., *Effect of flax fibres individualisation on tensile failure of flax/epoxy unidirectional composite*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013. **51**: p. 62-70.
59. Phillips, S., et al., *Characterization of flax/epoxy prepgs before and after cure*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2013: p. 0731684412473359.
60. Meredith, J., et al., *On the static and dynamic properties of flax and Cordenka epoxy composites*. Composites Science and Technology, 2013. **80**: p. 31-38.
61. Thomsen, O.T., *Sandwich materials for wind turbine blades—present and future*. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2009. **11**(1): p. 7-26.
62. Hou, S., et al., *Crashworthiness optimization of corrugated sandwich panels*. Materials & Design, 2013. **51**: p. 1071-1084.
63. Saha, G.C., A.L. Kalamkarov, and A.V. Georgiades, *Effective elastic characteristics of honeycomb sandwich composite shells made of generally orthotropic materials*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(6): p. 1533-1546.
64. Pflug, J. and I. Verpoest, *Sandwich materials selection charts*. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2006. **8**(5): p. 407-421.
65. Sun, Z., et al., *On compressive properties of composite sandwich structures with grid reinforced honeycomb core*. Composites Part B: Engineering, 2016. **94**: p. 245-252.
66. Stocchi, A., et al., *Manufacturing and testing of a sandwich panel honeycomb core reinforced with natural-fiber fabrics*. Materials & Design, 2014. **55**: p. 394-403.
67. Habibi, M., G. Lebrun, and L. Laperrière, *Experimental characterization of short flax fiber mat composites: tensile and flexural properties and damage analysis using acoustic emission*. Journal of Materials Science, 2017. **52**(11): p. 6567-6580.
68. Talvensaari, H., E. Ladstätter, and W. Billinger, *Permeability of stitched preform packages*. Composite structures, 2005. **71**(3-4): p. 371-377.

69. Shah, D., et al. *Mechanical characterization of vacuum infused thermoset matrix composites reinforced with aligned hydroxyethylcellulose sized plant bast fibre yarns*. in *4th international conference on sustainable materials, polymers and composites*. 2011.
70. Lu, J., N. Kashaev, and N. Huber, *Optimization of crenellation patterns for fatigue crack retardation via genetic algorithm and the reduction in computational cost*. Engineering Failure Analysis, 2016. **63**: p. 21-30.
71. Omkar, S.N., et al., *Artificial Bee Colony (ABC) for multi-objective design optimization of composite structures*. Applied Soft Computing, 2011. **11**(1): p. 489-499.
72. Almeida, F.S. and A.M. Awruch, *Design optimization of composite laminated structures using genetic algorithms and finite element analysis*. Composite Structures, 2009. **88**(3): p. 443-454.
73. Assarar, M., et al., *Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax-fibres and glass-fibres*. Materials & Design, 2011. **32**(2): p. 788-795.
74. Aslan, M., *Investigation of damage mechanism of flax fibre LPET commingled composites by acoustic emission*. Composites Part B: Engineering, 2013. **54**: p. 289-297.
75. El Mahi, A., et al. *Analyse par émission acoustique de l'endommagement des matériaux éco-composites*. in *10ème Congrès Français d'Acoustique*. 2010.
76. Bravo, A., et al., *Development of novel green and biocomposite materials: Tensile and flexural properties and damage analysis using acoustic emission*. Materials & Design (1980-2015), 2015. **66**: p. 16-28.
77. Standard, A., *C393–00. Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions*. 2000, ASTM C393.