



UFR SCIENCES ET TECHNIQUES  
LICENCES RENFORCÉE DE SCIENCES POUR  
L'INGÉNIEUR

---

Composites renforcés par des fibres naturelles

---



Bonnard Sandro L2SI

*Tuteur* : Berlioz Sophie  
*Laboratoire* : MAPIEM

2023-2024

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Matériaux composite</b>	<b>3</b>
2.1	Généralités . . . . .	3
2.2	Matériaux composite renforcé par des fibres naturelles . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Propriétés des fibres naturelles</b>	<b>4</b>
3.1	Types de fibres naturelles et de matrices utilisées dans les composites . . . . .	4
3.2	Caractéristiques physiques, mécaniques des fibres naturelles et variabilité des propriétés . . . . .	6
3.2.1	Structure des fibres végétales . . . . .	6
3.2.2	Caractéristique mécanique . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Techniques de fabrication</b>	<b>8</b>
4.1	Traitement de la fibre . . . . .	8
4.2	Procédés de fabrication . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Résistance mécanique des composites renforcés par des fibres naturelles</b>	<b>13</b>
5.1	Méthode d'étude de la résistance à la traction, à la compression, et à la flexion . . . . .	13
5.2	Analyse de la fatigue et de l'endommagement . . . . .	15
5.3	Conclusion . . . . .	16
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>17</b>

## 1 Introduction

Les composites renforcés par des fibres naturelles ont suscité un intérêt croissant dans le domaine des matériaux composites en raison de leur potentiel à offrir une alternative durable et écologique aux composites traditionnels renforcés par des fibres synthétiques. Ces matériaux hybrides combinent les propriétés uniques des fibres naturelles avec des matrices polymères pour créer des produits dotés de performances mécaniques compétitives tout en réduisant l'empreinte environnementale.

Les fibres naturelles, telles que le bambou, le lin, le chanvre, le jute, la cellulose et la fibre de coco, présentent des caractéristiques intrinsèques telles que leur légèreté, leur disponibilité, leur faible coût et leur biodégradabilité. Leur utilisation comme renforts dans les composites offre une alternative attrayante aux fibres synthétiques, réduisant ainsi la dépendance aux ressources non renouvelables et contribuant à atténuer les problèmes environnementaux.

Cependant, malgré leurs avantages potentiels, les composites renforcés par des fibres naturelles sont confrontés à des défis techniques et scientifiques qui doivent être surmontés pour assurer leur adoption généralisée. Ces défis incluent la variation naturelle des propriétés des fibres, leur compatibilité avec les matrices polymères, la sensibilité à l'humidité et la prédiction précise des performances des composites.

Ainsi, cette étude vise à examiner les différentes facettes des composites renforcés par des fibres naturelles. Cela comprend une analyse détaillée des propriétés des fibres naturelles, des mécanismes de renforcement, des techniques de fabrication et des propriétés des composites obtenus. Pour cela nous étudierons les propriétés des fibres végétales et analyserons les études comparatives avec les fibres synthétiques, telles que la fibre de verre.

En comprenant mieux ces matériaux et en surmontant les défis techniques associés, nous pourrons exploiter pleinement leur potentiel pour répondre aux exigences croissantes en matière de durabilité et de performance dans diverses applications industrielles.

## 2 Matériaux composite

### 2.1 Généralités

Les matériaux composites sont des matériaux réalisés à partir d'une matrice et de renforts.

La matrice peut avoir plusieurs origines. Nous retrouvons donc des matériaux à matrice céramique, métallique et organique. Leur rôle principal est de transmettre les efforts au renfort tout en maintenant la cohésion de la structure dans laquelle les fibres de renforts s'insèrent. Ces matrices présentent une résistance mécanique faible vis-à-vis de la résistance du renfort.

Par conséquent, pour obtenir un matériau composite, il faut choisir un renfort cohérent avec les applications souhaitées.

Pour cela il existe plusieurs types de renfort :

- Les renforts inorganiques : fibre de verres, de carbone, de céramique, de métal, ...
- Les fibres organiques naturelles : fibre de lin, de soie, ...
- Les fibres organiques de synthèse : fibre de polyester, de polyamide, ...

Selon le type de matrices utilisées et les objectifs que nous souhaitons atteindre, plusieurs combinaisons sont donc possibles.

Dans notre projet de recherche, nous allons travailler sur les composites renforcés par les fibres naturelles. Ces fibres de renforts sont plus communément associées à des matrices à base de polymères, plus précisément des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques.

Comme nous pouvons le voir dans figure 1, les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles sont déjà utilisés dans de nombreuses industries. Notamment dans l'automobile, le domaine nautique, aéronautique, mais aussi dans l'ingénierie civile.



Habillement de portière de voiture en lin/polypropylène



Pièce de bateau en composite renforcé par des fibres de coton

FIGURE 1 – Exemple d'utilisation des matériaux composites renforcés par des fibres naturelles [1]

## 2.2 Matériaux composites renforcés par des fibres naturelles

Les composites renforcés par des fibres naturelles présentent énormément d'intérêt dans le domaine de l'ingénierie et de l'industrie. En effet, ces matériaux étant d'origine naturelles présentent un intérêt écologique certain et ce sur plusieurs aspects.

Tout d'abord, ces fibres proviennent de ressources renouvelables et qui peuvent être produites localement. Ces matériaux par leur nature, sont aussi biodégradables, si non détériorés lors de leurs traitements. Tout ceci permet donc à ces fibres d'être considérées neutres vis à vis de la production de CO<sub>2</sub>, dans un grand nombres de cas.

De plus, ces fibres présentent un intérêt majeur du à leurs propriétés mécaniques. Ces fibres sont utilisées pour remplacer la fibre de verre, nous pouvons principalement citer le lin comme exemple de fibre naturelle pouvant prendre la place de la fibre de verre.

Les biocomposites ont fait l'objet d'énormément de travaux depuis les années 1980, nous pouvons par exemple citer Christophe Baley qui a publié, entre 2004 et 2020, quatre articles portant le même titre : « Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites ». Ces matériaux étant constitués de fibres de renforts naturelles et/ou d'un biopolymère servant de matrice. Ce type de matériau présente un énorme avantage écologique en comparaison avec d'autres matériaux composites.

## 3 Propriétés des fibres naturelles

### 3.1 Types de fibres naturelles et de matrices utilisées dans les composites

Les fibres naturelles utilisées dans la confection de biocomposites peuvent être classées selon trois origines différentes.

Nous avons les fibres d'origine minérale, que nous n'étudierons pas ici, telle l'amiante. Les deux autres origines de fibres sont les fibres d'origine végétale et animale.

Les fibres peuvent être extraites de différentes parties :

- Pour les végétaux, nous pouvons extraire des fibres utilisables dans la confection de biocomposites à partir de la plante. Nous pouvons extraire

les fibres des graines (fibres provenant des poils séminaux) comme avec le coton ou encore le kapok ; les fibres libériennes extraites des tiges du lin, chanvre, jute et ramie ; les fibres dures extraites des feuilles du sisal ou de l'abaca ; ou celles extraites des fruits comme avec l'enveloppe de la noix de coco.

- Pour les animaux, les fibres sont extraites des poils de l'animal (laine) ou de leurs sécrétions (soie).

Pour l'application désirée il faudra donc choisir les fibres en fonction de leurs caractéristiques physique, mécanique, thermique,...

Prenons pour exemple la laine, celle ci comporte peu de faibles propriétés de résistance à la traction mais dans une application où nous aurions besoin de propriété d'isolation thermique, elle peut être intéressante.

En revanche, si nous souhaitons fournir des propriétés mécaniques intéressantes à notre biocomposite (avoir une bonne résistance à la traction) nous allons plutôt nous pencher vers les fibres présentant de bonnes caractéristiques dans ce domaine, comme le lin ou la soie, et plus généralement les fibres provenant de tiges, feuilles, fruits et sécrétions animales.

Les fibres naturelles présentent de nombreux avantages environnementaux, tels que leur disponibilité et leur caractère renouvelable, ainsi que leur capacité à être compostées en fin de vie. Cependant, elles sont confrontées à des défis, notamment leur grande variabilité en termes de propriétés mécaniques, leur vulnérabilité aux attaques environnementales et leur sensibilité aux conditions de croissance et aux méthodes de traitement.

Quant aux matrices, les plus utilisées en association avec les fibres naturelles sont les thermoplastique et les thermodurcissables.

Les matrices thermoplastiques sont utilisées par exemple dans le domaine du textile. Celles-ci sont caractérisées par des chaînes de polymères, elles sont ensuite chauffées ce qui les rend malléables et leur permet de prendre la forme souhaitée. Lors de leur refroidissement ces matrices se rigidifient. Ce sont donc des matériaux que nous pouvons faire fondre et mouler de nouveau. Les thermodurcissables sont issus d'une réaction chimique qui est irréversible, ce qui empêche donc le recyclage de ceux-ci.

## 3.2 Caractéristiques physiques, mécaniques des fibres naturelles et variabilité des propriétés

### 3.2.1 Structure des fibres végétales

Les fibres naturelles sont composées principalement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. La composition varient dépendamment de plusieurs facteurs tels le type de fibre, le stade de développement, son âge et les conditions climatiques. La structure des fibres végétales est un empilement de couches comprenant une lamelle mitoyenne, une paroi primaire et une paroi secondaire.

La lamelle mitoyenne assure la cohésion des fibres en agissant comme une matrice, elle est riche en lignine et en hémicellulose. La lignine est un polymère rigide qui agit comme un ciment entre les fibres, tandis que l'hémicellulose est un polymère ramifié qui englobe les micro-fibrilles de manière adhésive. Nous avons ensuite la paroi primaire qui est mince et hydratée, celle-ci se compose de celluloses microfibrillaires non orientées, ce qui offre une structure de support flexible. En revanche, la paroi secondaire est beaucoup plus épaisse, elle est constituée de trois parties distinctes : la paroi externe S1, la paroi centrale S2 et la paroi interne S3.

Bien que les fibres naturelles offrent des avantages significatifs en termes de durabilité et de faible impact environnemental, leur utilisation efficace dans les composites nécessite une compréhension approfondie de leurs propriétés et des méthodes de traitement adaptées pour surmonter les défis rencontrés.

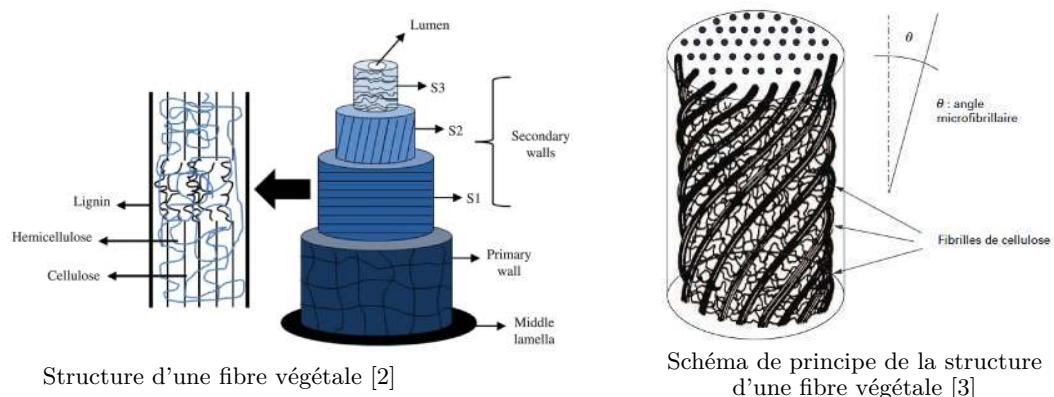


FIGURE 2 – Structure des fibres végétales

### 3.2.2 Caractéristique mécanique

Les fibres naturelles présentent différentes caractéristiques mécanique que nous pouvons exploiter pour la confection de matériaux composites. Ces fibres possèdent des caractéristiques de résistance à la traction, à la compression et à la flexion. Ce sont des aspects cruciaux dans le choix de nos fibres. Comme nous pouvons le voir dans le tableau 1, les fibres naturelles peuvent atteindre, sur le plan de la traction des caractéristiques similaires aux fibres synthétiques, tel que la fibre de verre, notamment les fibres de lin qui, dans les conditions optimales de la fibre, présentent des caractéristiques comparables en terme de traction à la fibre de verre.

Le module d'élasticité, ou module de Young, est une mesure de la rigidité d'un matériau. Il indique la capacité d'un matériau à retrouver sa forme originale après avoir subi une contrainte. Pour les fibres naturelles, ce module varie en fonction de la source de la fibre et de son traitement. Les fibres naturelles, bien que moins rigides que les fibres synthétiques, offrent des performances adéquates pour de nombreuses applications. Tout comme la résistance à la traction le lin reste le matériau le plus proche des fibres synthétiques.

Le point le plus important à prendre en compte est la variabilité des différentes caractéristiques des fibres naturelles pour un même type de fibre. Ces variations sont multifactorielles, elles peuvent dépendre de la partie de la plante utilisée, du traitement de la fibre, et surtout les conditions de croissance. En effet, le climat, le sol et le moment de la récolte ont un impact direct sur la qualité de la fibre et donc sur les propriétés mécaniques.

Pour compenser ces défauts, plusieurs systèmes doivent être mis en place pour contrôler et améliorer la qualité de nos fibres. Il faut dans un premier temps sélectionner et contrôler la qualité des fibres produites pour sélectionner les lots les plus performants. Après analyse il faudra alors adapter les traitements sur les fibres, permettant d'optimiser les performances des fibres et de leur adhérence avec la matrice.

La variabilité des propriétés mécaniques des fibres naturelles, due à leur origine, traitement, condition de croissance, pose des défis mais aussi des opportunités pour les composites renforcés. En comprenant et en contrôlant ces facteurs, il est possible de maximiser les avantages des fibres naturelles tout en atténuant leurs inconvénients, créant ainsi des matériaux composites performants et écologiquement responsables.

TABLE 1 – Propriétés mécaniques moyennes en traction de fibres naturelles comparées aux fibres de renfort synthétiques [2]

Fibres	E (GPa)	A (%)	$\sigma_u$ (MPa)	Densité
<b>Fibres synthétiques</b>				
Verre E				
Filament vierge	72 - 73	4,6 - 4,8	3200 - 3400	2,54
Filament industriel	72 - 73	3	2000 - 2400	2,54
Carbone				
Toray T300	230	1,5	3530	1,7 - 1,9
Thorneel P-120 S	825	0,3	2350	1,87 - 2
<b>Fibres végétales</b>				
Lin	12 - 85	1 - 4	600 - 2000	1,54
Chanvre	35	1,6	389	1,07
Jute	26,5	1,5 - 1,8	393 - 773	1,44
Sisal	9 - 21	3 - 7	350 - 700	1,45
Noix de coco	4 - 6	15 - 40	131 - 175	1,15
Coton	5,5 - 12,6	7 - 8	287 - 597	1,5 - 1,6
<b>Fibres animales</b>				
Ver à soie Attacus atlas	5	18	200	
Ver à soie Bombyx mori	16	15	650	
Araignée Argiope trifasciata	7	30	600	
E : module d'Young en traction ; A : allongement à rupture en traction ; $\sigma_u$ : contrainte à rupture en traction.				

## 4 Techniques de fabrication

### 4.1 Traitement de la fibre

La réalisation de matériaux composites renforcés par des fibres végétales nécessite un traitement des fibres particuliers selon la fibre sélectionnée mais aussi pour conserver les propriétés intéressantes de celle-ci. En effet si lors du traitement de la fibre, ses propriétés mécaniques, et écologiques, se retrouvent dégradées, la réalisation d'un tel matériau n'a alors aucun intérêt.

C'est pourquoi plusieurs méthodes de traitement des fibres ont été conçues.

Les techniques mis en place pour séparer et présenter les fibres sont destinées à améliorer la compatibilité et l'adhérence de la fibre avec la matrice.

Pour séparer ses fibres nous pouvons utiliser plusieurs techniques :

- **Rouissage** : le rouissage est un processus de trempage des tiges de

plantes dans de l'eau ou dans un milieu humide afin de permettre la décomposition de la pectine, une substance qui lie les fibres entre elles dans la plante. Cela rend les fibres plus accessibles pour le traitement ultérieur en les ramollissant et en facilitant leur extraction.

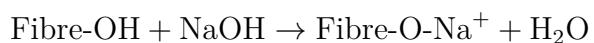
- **Broyage** : le broyage consiste à fragmenter les parties ligneuses des plantes, généralement après le rouissage, afin de faciliter la séparation des fibres des autres composants de la plante. Cette étape peut être réalisée mécaniquement à l'aide de machines ou manuellement.
- **Teillage** : le teillage est le processus de séparation des fragments ligneux obtenus après le broyage. Il peut impliquer des opérations de triage pour séparer les fibres des débris végétaux et d'autres matériaux non désirés.
- **Peignage** : le peignage est une étape de traitement des fibres qui consiste à démêler et à aligner les fibres dans une configuration parallèle. Cela peut être réalisé à l'aide de peignes spéciaux qui séparent et alignent les fibres, ce qui améliore leur qualité et leur uniformité pour une utilisation ultérieure dans la production de fils ou d'autres matériaux.

Après séparation des fibres, d'autres traitements sont nécessaire pour améliorer les performances, obtenir une excellente liaison matrice/fibre, diminuer le caractère hydrophile des fibres végétales, ou bien encore améliorer la résistance au feu.

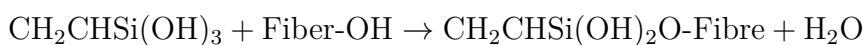
Nous pouvons donner l'exemple de quelques transformations chimiques possibles améliorant les performances :

- Traitement alcalin :

Les fibres sont immergées dans une solution de NaOH. Cela crée des vides et rend la surface rugueuse, améliorant ainsi l'adhérence fibre-matrice, dû à une réaction chimique. La réaction chimique est :



- Traitement au silane : Les agents de couplage au silane améliorent l'adhérence interfaciale et les propriétés mécaniques. Le silane forme une liaison chimique avec la cellulose et la matrice. Les réactions chimiques sont :



- Acétylation des fibres naturelles :

Les fibres deviennent hydrophobes en réagissant avec l'anhydride acétique. L'estérification des groupes hydroxyles améliore la compatibilité avec la matrice. La réaction chimique est :



Les fibres de renforts étant correctement préparées pourront par la suite servir à dans la fabrication des matériaux composites.

Les fibres traitées se présentent sous deux formes, soit sous forme de vrac les fibres sont de petites tailles calibrées, soit sous forme de nappes.

L'orientation des fibres dans les composites renforcés par des fibres naturelles est un aspect crucial pour assurer des performances mécaniques optimales.

Les fibres naturelles, telles que le jute, le lin, le bambou et le chanvre, possèdent des propriétés mécaniques intrinsèques qui peuvent être exploitées pour renforcer les matériaux composites. Cependant, ces fibres ont tendance à être anisotropes, c'est-à-dire qu'elles présentent des propriétés différentes selon leur orientation par rapport à la direction de sollicitation.

Une orientation adéquate des fibres naturelles dans le composite est donc essentielle pour maximiser leur efficacité en tant que renforts. Lorsque les fibres sont alignées dans la direction de la charge principale, elles peuvent absorber et transmettre efficacement les contraintes appliquées, augmentant ainsi la résistance et la rigidité du matériau dans cette direction.

Lors de l'association d'une matrice avec une fibre il est donc important de prendre en considération l'orientation de la fibre pour que le matériau composite travaille de la manière adéquate. Plusieurs procédés de fabrication de composites sont possibles selon la nature de la fibre et de la matrice.

## 4.2 Procédés de fabrication

Les fibres naturelles présentent quelques inconvénients qui doivent être pris en compte pour la mise en place de la fabrication de composite. Les fibres naturelles ont une tenue thermique relativement faible aux alentours de 200-230°C, cela représente donc une limite dans le choix et l'utilisation de certaines matrices, notamment pour les thermoplastiques.

Nous pouvons établir plusieurs méthodes régulièrement utilisées dans la confection de matériaux composites renforcées par des fibres naturelles, et nous pouvons voir que c'est techniques varient selon la fibre et la matrice sélectionnées (Table2).

- **Contact** : Le moulage au contact est un procédé manuel consistant à superposer des couches de renforcement (mat, tissus, fibres coupées) dans un moule, imprégnées de résine à l'aide de brosses ou rouleaux, et à éliminer les bulles d'air avec des rouleaux de débullage. Ce procédé est simple et peu coûteux, idéal pour les petites séries et les grandes pièces.
- **Enroulement filamentaire** : L'enroulement filamentaire est utilisé pour fabriquer des pièces cylindriques ou tubulaires. Les fibres continues sont guidées autour d'un mandrin en rotation et imprégnées de résine avant ou après le placement. Ce procédé est particulièrement adapté aux applications nécessitant des renforts de haute résistance.
- **Compression** : Des plaques de fibres, contenant une proportion minimale de fibres thermoplastiques, sont chauffées dans un four puis transportées vers une presse d'estampage. Cette presse frappe la pièce pour lui donner sa forme définitive.
- **RTM** : Le procédé de moulage par transfert de résine (RTM) est une technique de fabrication de composites où la résine est injectée dans un moule fermé contenant des renforts fibreux. Les étapes principales incluent la préparation du moule, le placement des renforts (mats, tissus tissés 2D ou 3D, ou préformes multiaxiales), l'injection de la résine sous pression pour imprégner uniformément les renforts et éliminer les vides, et enfin le durcissement de la résine pour former une pièce composite solide. Cette méthode permet de produire des pièces complexes avec une répartition homogène de la résine et des fibres, garantissant ainsi une haute qualité et des performances mécaniques optimales.
- **SMC** : Les fibres coupées sont imprégnées de résine et déposées sur un tapis, compressées entre des feuilles de protection. Utilisées avec des résines polyesters ou phénoliques, ces préformes sont découpées et utilisées dans des processus comme le RTM ou la résine infusion.
- **Injection** : Les granulés de thermoplastique sont ramollis et injectés

dans un moule, puis compressés pour former la pièce. Les fibres peuvent être mélangées aux granulés avant l'injection. Ce procédé est utilisé pour des matériaux thermoplastiques et élastomères, offrant des pièces solides et bien formées.

- **Pultrusion** : Des filaments continus sont utilisés, bien que dans certains cas, des mèches (roving) ou des tissus étroits ou 3D soient employés, notamment pour des applications impliquant du carbone. Les filaments sont disposés sur un centre et alimentent une tête d'imprégnation sans être coupés.
- **TRE** : Le composite thermoplastique renforcé de fibres est préparé par extrusion puis consolidé par compression dans un four de thermocompression à bandes. Ce procédé permet de fabriquer des pièces robustes avec des fibres bien intégrées.

Les divers procédés présentés, tels que le moulage au contact, l'extrusion, l'injection, etc., offrent des avantages spécifiques en termes de coût, de flexibilité de conception et de qualité des pièces produites.

Cependant, il est essentiel de prendre en compte les caractéristiques des fibres naturelles et des matrices polymères utilisées, ainsi que les exigences spécifiques de chaque application, lors du choix du procédé de fabrication optimal. De plus, la maîtrise des paramètres de fabrication, tels que la température, la pression, le temps de traitement, etc., nous permet de répondre aux normes de performance requises.

L'innovation continue dans le domaine des procédés de fabrication est nécessaire pour relever les défis techniques et améliorer l'efficacité de la production des composites renforcés par des fibres naturelles. Cela peut impliquer le développement de nouvelles techniques de traitement des fibres, l'optimisation des méthodes d'impregnation de la résine, ou encore l'intégration de technologies avancées telles que l'impression 3D.

TABLE 2 – Procédés de transformation de matériaux composites renforcés par des fibres naturelles [1]

Technologie	Fibres	Matrice
<b>Résine thermodurcissable</b>		
Contact	Ramie	Polyester
SMC (3)	Lin	Polyester
Enroulement filamentaire	Jute	Polyester
Compression	Coton-kapok	Polyester
Pultrusion	Jute	Vinylester
RTM (1)	Chanvre	Phénolique
RTM	Soie	Époxyde
RTM	Kenaf	Polyester
<b>Résine thermoplastique</b>		
Injection	Chanvre	ABS
Pultrusion	Lin	Polypropylène
TRE (2)	Lin	Polyéthylène
Compression	Kenaf	Acrylique

(1) RTM : Resin Transfer Molding.  
 (2) TRE : Thermoplastique Renforcé Estampable  
 (3) SMC : Sheet Molding Compound

## 5 Résistance mécanique des composites renforcés par des fibres naturelles

### 5.1 Méthode d'étude de la résistance à la traction, à la compression, et à la flexion

L'étude de la résistance des matériaux composites est une part très importante dans la compréhension des domaines d'application possibles des matériaux composites renforcés par des fibres naturelles. Les fibres naturelles offrent des caractéristiques différentes selon leurs natures et traitements. Certaines fibres permettent l'augmentation de performances de résistance à la traction, à la compression ou encore à la flexion. C'est pourquoi différentes méthodes d'études ont été mises en place pour étudier les différentes propriétés des fibres.

- **Étude de la résistance à la traction :** il s'agit du test le plus classique pour étudier la résistance des matériaux. Cela consiste en l'application d'une charge de tension sur le matériau, cette tension est appliquée jus-

qu'à la cassure du matériau étudié. Cette tension est contrôlée par une machine contenant de nombreux capteurs, ce qui nous permet alors de déterminer le module de Young, l'allongement à la rupture et la résistance à la traction.

- **Étude de la résistance à la flexion :** ce test consiste à appliquer une charge au centre de l'échantillon supporté par deux autres points. La charge est appliquée jusqu'à rupture ou un certain niveau de déformation. Cela nous permet d'obtenir la résistance à la flexion, le module de flexion et la déformation à la rupture de l'échantillon.

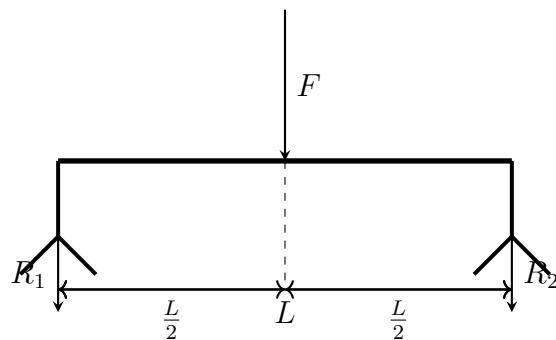


FIGURE 3 – Schéma étude de la résistance à flexion

- **Étude de la résistance à la compression :** pour étudier la résistance à la compression l'échantillon est placé entre deux plaques, touchant les extrémités, la machine va alors appliquer une charge qui permettra de mesurer la résistance à la compression, le module d'élasticité et la limite d'élasticité à la compression.
- **Étude de la résistance à l'impact :** cela permet de mesurer la ténacité de l'échantillon, c'est-à-dire sa capacité à absorber de l'énergie et à se déformer plastiquement avant de rompre. Pour cela plusieurs dispositifs existent, notamment le test d'impact de Charpy, qui consiste en un marteau pendulaire qui frappe l'échantillon, usiné de manière spécifique, dans une entaille en forme de V ou de U de l'échantillon. L'énergie absorbée par l'échantillon lors de la fracture est mesurée, généralement en joules (J). Cette énergie est déterminée par la différence entre la hauteur de chute initiale du pendule et la hauteur après fracture.

Les études réalisées sur les matériaux composites nous donnent un grand nombre de données permettant de comparer la résistance des composites par

ajout de fibres naturelles par rapport aux fibres synthétiques. Par exemple, le tableau 3, repris de l'article de christophe Baley sur les fibres naturelles de renfort pour matériaux composites de 2004, nous montre que les fibres de lin peuvent avoir des caractéristiques similaires aux fibres de verre dans les composites à base de polyester. Une différence significative est toute fois notable dans la résistance à l'impact. Il est donc très fortement concevable de remplacer les fibres de verre par les fibres de lin dans certaines applications utilisant le SMC, si la pièce conçue reçoit des impacts de faible intensité.

TABLE 3 – Exemples de propriétés mécaniques de SMC (matrice polyester) [1]

Propriétés des matériaux composites	Nature des fibres			
	verre		lin	
	Longueur des fibres (mm)			
	6	25	6	25
Module d'Young en traction.....(GPa)	8	11	7	12
Résistance en traction.....(MPa)	35	75	40	80
Module d'Young en flexion.....(GPa)	7	11	7	12
Résistance en flexion.....(MPa)	70	160	83	144
Résistance à l'impact.....(kJ/m <sup>2</sup> )	40	70	11	22

## 5.2 Analyse de la fatigue et de l'endommagement

Bien que les composites renforcés par des fibres naturelles comportent des caractéristiques mécaniques intéressantes, un point très important dans la confection d'une pièce composite et notamment sa durabilité. Cette durabilité est mesuré en analysant sa résistance à la fatigue.

Pour cela, des expériences de résistance à la fatigue sont réalisées. L'échantillon usiné est placé dans une machine d'essai de traction. Cette machine applique alors ensuite un grand nombre de cycles de traction sur la pièce avec un stress constant, le stress sera par la suite augmenter pour un même nombre de cycle, et cela se répète jusqu'à la cassure de l'échantillon.

L'étude menée par Gassan en 2002, « A study of fibre and interface parameters affecting the fatigue behaviour of natural fibre composites », montre que la résistance à la fatigue est multifactorielle. Cette résistance dépend du type de renfort, de la répartition et emplacement des fibres dans la matrice, de l'adhésion entre la fibre et la matrice, et les propriétés mécaniques intrinsèques de la fibre. Cette étude a aussi montré que la fatigue provient de l'endomma-

gement et notamment de son évolution provenant de micro-fissures. Certains points peuvent être améliorés pour limiter la fatigue de la pièce. L'adhésion fibre/matrice étant liée aux traitements de la fibres, en améliorant cette adhésion nous pouvons améliorer la résistance à la fatigue de la pièce conçue.

### 5.3 Conclusion

L'étude de la résistance mécanique des composites renforcés par des fibres naturelles nous montre que les fibres naturelles présentent un intérêt important pour remplacer les fibres synthétiques, dû à leur propriétés mécaniques pouvant être proche des fibres synthétiques et de leur résistance à la fatigue plutôt inintéressante . Cependant, il est encore nécessaire de continuer à étudier les différentes configurations possibles d'association fibre/matrice, le traitement de la fibre et les méthodes d'usinage pour optimiser la résistance des matériaux.

## 6 Conclusion

Les fibres naturelles offrent une alternative prometteuse et écologique aux fibres synthétiques dans la fabrication de matériaux composites. Les principaux composants des fibres naturelles, tels que la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, confèrent à ces matériaux des propriétés mécaniques spécifiques qui peuvent rivaliser avec celles des fibres synthétiques. Cependant, des défis subsistent, notamment la variabilité des propriétés mécaniques et la sensibilité aux conditions environnementales.

Les procédés de fabrication de composites renforcés de fibres naturelles, comme le moulage par contact, l'injection et la compression, doivent être soigneusement optimisés pour maximiser les performances tout en minimisant les impacts environnementaux. En explorant davantage les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres naturelles et en développant des méthodes de traitement et de fabrication innovantes, il est possible de surmonter les obstacles actuels.

En conclusion, l'intégration des fibres naturelles dans les matériaux composites représente une voie prometteuse vers des solutions durables et performantes, répondant aux besoins croissants de l'industrie tout en contribuant à la préservation de notre environnement. Les recherches et les innovations dans ce domaine continueront à jouer un rôle crucial dans le développement de matériaux avancés et écologiquement responsables.

## Références bibliographique

- [1] Baley, C. (2004). Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Plastiques et Composites. <https://doi.org/10.51257/a-v1-am5130>
- [2] Tossou, E. (2019). Développement de nouveaux composites hybrides renforcés par des fibres de carbone et de lin : mise en oeuvre et caractérisation mécanique. <https://www.theses.fr/2019NORMC209.pdf>
- [3] Baley, C. (2020). Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Plastiques et Composites. <https://doi.org/10.51257/a-v3-am5130>
- [4] Baley, C. (2002). Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. Composites. Part A, Applied Science And Manufacturing, 33(7), 939-948.  
[https://doi.org/10.1016/s1359-835x\(02\)00040-4](https://doi.org/10.1016/s1359-835x(02)00040-4)
- [5] Kueny, R. (2013). Biocomposites : composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750535>
- [6] Ranjan, C., Sarkhel, G., and Kumar, K. (2023). Efficacy of natural fibre reinforced biodegradable composite towards industrial products – An extensive review. Materials Today : Proceedings, 92, 1047-1054.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.689>
- [7] Dimple, N., Singh, G., and Mangal, R. (2023). A comprehensive review of natural fiber reinforced composite and their modern application. Materials Today : Proceedings, 92, 542-548.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.745>
- [8] Yamini, P., Rokkala, S., Rishika, S., Rani, P. M., and Kumar, R. A. (2023). Mechanical properties of natural fiber reinforced composite structure. Materials Today : Proceedings.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.547>
- [9] Gassan, J. (2002). A study of fibre and interface parameters affecting the fatigue behaviour of natural fibre composites. Composites. Part A, Applied Science And Manufacturing, 33(3), 369-374.  
[https://doi.org/10.1016/s1359-835x\(01\)00116-6](https://doi.org/10.1016/s1359-835x(01)00116-6)
- [10] Elouaer, A. (2011). Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales. <https://www.theses.fr/2011REIMS003.pdf>

- [11] Pereira, P.H.F., De Freitas Rosa, M., Cioffi, M.O.H., De Carvalho Benini, K.C.C., Milanese, A.C., Voorwald, H.J.C., and Mulinari, D.R.(2015). Vegetal fibers in polymeric composites : a review. *Polímeros*, 25(1), 9-22. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1722>
- [12] SOLUTIONS COMPOSITES. (2022, 14 décembre). COMPOSITES - Solutions Composites. Solutions Composites. <https://solutionscomposites.fr>
- [13] Gigliotti, M., Grandidier, J., and Lafarie-Frenot, M. C. (2013). Vieillissement des composites à matrice organique - Outils de modélisation. *Plastiques et Composites*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-am5322>