

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Scientifique Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie de l'Environnement

Laboratoire des sciences et techniques de l'Environnement

Mémoire Master

Etude des matériaux bio-composites

Présenté par :

Hadjer BEN ALI

Sous la direction de Mme N. BELHANECHÉ Enseignante à l'école nationale polytechnique, d'Alger Présenté(e) et soutenue publiquement le (11/06/2016)

Composition du Jury :

Président : Mr A. CHERGUI Pr, ENP

Promotrices : Mme. N. BELHANECHÉ Pr, ENP

Mme. B. BOUBEKEUR MCB, Université de Boumerdes

Examineur : Mr. H. BALOUL MAA, Université de Boumerdes

ENP 2016

الملخص

مع في الأونة الأخيرة كثر النقاش بشأن المحافظة على الموارد الطبيعية وإعادة تدويرها مما قادنا الى الاهتمام بكل ما هو حيوي التركيز على المواد الخام المتجددة

بسبب زيادة الوعي البيئي ومطالب السلطات المتخصصة باستخدام الالياف الطبيعية وإزالة الهياكل المركبة التقليدية، التي عادة ما تكون مصنوعة من الألياف الزجاجية والكربون والفينولات الخطيرة. زاد البحث في مجال تطوير الألياف الطبيعية وعلوم المركبات الحيوية الذي ساهم بشكل كبير خاصة في القرن ال 21 بتخفيف مشاكل البيئة الخطيرة وتلبية الاحتياجات المختلفة للمستهلك وبأسعار رخيصة.

هذه الدراسة تتطرق الى المواد الأولية الخام المتجددة وبالتحديد الى الالياف الطبيعية واستعراض هيكلتها، خصائصها وتطبيقاتها الفعالة في مجال النقل، المنسوجات، الزراعة، عتاد الرياضة والعمران.

الكلمات المفتاحية: المركبات الحيوية، الالياف الطبيعية، المواد الخام المتجددة، البيئة

Abstract

Recently, the critical discussion on the preservation of natural resources and recycling led to a renewed interest in biomaterials focusing on renewable raw materials. The use and disposal of traditional composite structures, usually fiberglass, carbon and phenolic compounds, are considered critical because of the increasing of the environmental awareness.

Recent advances in the development of natural fiber and composites science, offer significant opportunities for improving materials from renewable resources with the important feature of composite materials then they are tailored to meet different requirements with reduced costs.

In this manuscript we will look at renewable raw materials specifically natural fibers based on the study of their structures, their characteristics and their applications in the field of transport, textiles, agriculture, equipment Sport and construction.

Keywords: composites, natural fibers, renewable raw materials, environment

Résumé

Récemment, la discussion critique sur la préservation des ressources naturelles et le recyclage a conduit à un regain d'intérêt concernant les biomatériaux en mettant l'accent sur les matières premières renouvelables. L'utilisation et l'élimination de structures composites traditionnelles, généralement en fibres de verre, carbone et les composés phénoliques, sont considérées comme critique en raison de l'augmentation de la conscience environnementale.

Les récents progrès dans le développement des fibres naturelles et la science des composites offrent des possibilités importantes pour l'amélioration des matériaux issus de ressources renouvelables la caractéristique importante des matériaux composites est qu'ils peuvent être conçus et adaptés pour répondre à des exigences différentes et avec des couts réduits. Dans ce manuscrit on va s'intéresser aux matières premières renouvelables spécifiquement les fibres naturelles en s'appuyant sur l'étude de leurs structures, leurs caractéristiques ainsi que leurs applications dans le domaine du transport, des textiles, de l'agriculture, des équipements du sport et de la construction.

Mots-clés : biocomposites, fibres naturelles, les matières premières renouvelables, environnement.



Dédicaces

Quoi que de plus que de pouvoir partager les meilleurs moments de sa vie avec les êtres qu'on aime. Arrivée au terme de mes études, j'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

Tout d'abord, louanges à dieu tout puissant qui m'a donnée toutes les capacités physique et morales pour la réalisation du présent travail

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.

A mon frère : Acheraf et son épouse Hadjer, à mon petit frère Khaire El Dine pour leur soutien et leur amour.

A mes sœurs : Amina, Khadidja, Romaiissa, Ranya et Aya hibate El Rahman, pour Leur amour et soins.

A mes petites nièces adorées Hadil et Jouri.

A ma grande famille chacun avec son nom.

A tous mes ami(e)s, merci pour votre soutien et vos conseils.

A toute la promotion de génie de l'environnement 2013/2016.

Merci à tous.

Hadjer



Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné la force et la volonté à finaliser ce travail.

Je veux tout d'abord exprimer ma profonde reconnaissance à mes deux promotrices de mémoire, Mme N. BELHANECHÉ, Professeur à l'ENP et Mme B. BOUBEKEUR, Maître de conférences, à l'Université de Boumerdes. Je ne peux que les remercier, non seulement de nous avoir encadré et assisté tout au long de ce travail, mais aussi pour leurs compétences scientifiques, leur disponibilité et leurs conseils précieux.

Je tiens à remercier sincèrement, Mr A. CHERGUI, professeur à l'ENP de m'avoir fait l'honneur de présider notre juré de mémoire.

Je remercie également, Mr H. BALOUL, Maître-assistant à l'Université de Boumerdes pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de donner une partie de son précieux temps en tant qu'examineur et d'avoir ainsi partagé une partie de son savoir.

J'adresse mes remerciements à mes parents qui m'ont toujours soutenu, à tous mes proches petits et grands, spécialement mes meilleurs amis, qui m'ont été d'un très grand soutien moral, par leur présence et encouragements.

Mes remerciements vont enfin à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Merci...

Tables des matières

Résumé

Dédicaces

Remerciements

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	10
CHAPITRE 1 : GENERALITE SUR LES BIO – COMPOSITES,	12
1.1. Introduction	13
1.2. Définition de bio composites.....	13
1.3. Historique.....	13
1.4. Classification des bio composites	14
1.5. La Composition des fibres naturelles	15
1.6. Extraction des fibres végétales	21
1.6.1. Rouissage biologique.....	21
1.6.2. Rouissage chimique.....	21
1.6.3. Rouissage mécanique.....	22
1.7. Composites à base de fibres naturelles	22
Chapitre 2 : Quelques exemples sur les bio – composites.....	24
2.1. Introduction	25
2.2. Fibres naturelles d’origine végétale.....	25
2.2.1. Fibre de chanvre	25
2.2.2. Fibre de Lin	27
2.2.3. Fibre de Ramie.....	28
2.2.3.Fibre de Sisal.....	28
2.2.5. Fibre de Coir de la noix de coco.	29
2.2.6. Fibre de Kéna (ou Hibiscus hema).....	29
2.2.7. Fibre de Jute.	30
2.2.8 Fibre d’Alfa	31
2.2.9. Fibre de Bambou	32

Sommaire

2.2.10. Fibre de diss (Ampelodesmosmauritanicus)	32
2.3. fibres naturelles d'origine animale	34
2.3.1. Fibre d'alpaga	34
2.3.2. Fibre de L'angora	34
2.3.3. Fibre de cachemire	35
2.3.4. Fibre de Ver à soie	35
2.4. Fibres naturelles d'origine minérale (L'amiante)	36
Chapitre 3 Propriétés des fibres et leur applications	37
3.1. Introduction	38
3.2. Propriétés	38
3.2.1. Propriétés physiques et mécaniques des fibres naturelles et artificielle.....	38
3.2.2. Propriétés thermiques des fibres naturelles	42
3.3. Facteurs influençant la caractérisation des fibres végétales	43
3.3.1. Effet de l'humidité et de la température	43
3.3.2.. Aspect statistique	44
3.4. Les applications	44
3.4.1. Automobile et transport.....	44
3.4.2. Bâtiment / Construction / Aménagement de la maison	45
3.4.2.1. Isolation	45
3.4.2.2. Profilés pour terrasses, sols et bardage	45
3.4.3 Sports & loisirs.....	46
3.4.4 Fibres textiles	47
Chapitre 4 le marché, les avantage, les inconvénients et l'impact environnemental des bio-composites.....	49
4.1 Introduction	50
4.2. Les avantages des fibres naturelles.....	50
4.3. Les inconvénients des fibres naturelles	52
4.3.1. Problèmes d'adhésion fibres/matrice	52
4.3.2. Problèmes de densité apparente	52
4.3.3. Problèmes de viscosité.....	52
4.3.4. Problèmes d'odeurs	52
4.3.5. Problème de la température	52
4.3.6. Problème pour la santé	53
4.4. Le marché.....	53
4.4.1. Bio-composites "vert-vert".....	54
IV.5. L'impact environnemental des bio composite.....	55

Sommaire

4.5.1. Impact environnemental des bio-composites mesuré par l'analyse du cycle de vie.....	55
4.6. De multiples techniques pour recycler les bio-composites	56
4.6.1. Recyclage mécanique	56
4.6.2. Recyclage par remoulage	56
4.6.3. Recyclage par voie chimique	56
4.7. Polymères et fibres utilisables	57
4.7.1. Modification des fibres naturelles comme solution.....	57
Conclusion générale	59
Références	61

Liste des figures

Figure 1.1. : Classification des fibres naturelles.....	16
Figure 1.2 : Structure des fibres de bois d'après Harrington,.....	18
Figure 1.3 : Structure du bois.....	18
Figure 1.4. : Structure chimique de la cellulose.....	19
Figure. 1.5 : structure chimique d'une hémi-cellulose.	19
Figure 1.6: structure chimique de la lignine.....	19
Figure. 1.7 : Structure chimique de la fibroïne.....	21
Figure.1.8 : Structure chimique de la chitine.....	21
Figure. 1.9 : Diagramme des techniques d'extraction des fibres végétales.....	23
Figure 2.1: Cannabis sativa L.....	26
Figure. 2.2 : le chanvre.	26
Figure. 2.3 : Tige du Cannabis sativa L.....	26
Figure. 2.4 : le lin	28
Figure.2.5 le Ramie	29
Figure 2.6 : le sisal	29
Figure 2.7: le coco	29
Figure 2.8 : Fibre de Kenaf	30
Figure. 2.9.Plante de jute Typique a, b et c botte de fibres extraite de la tige de jute.....	31
Figure 2.10 : Portion d'une section verticale de fibre de jute (a), amas de fibre (b), et brins tressé et filé (c)	31
Figure. 2.11. l'Alfa	32
Figure.2.12: Le bambou Đang Ngà	33
Figure.2.13. Herbe de Diss Ampelodesmos mauritanicus.	34
Figure.2.14. Alpaga	35
Figure.2.15. lapin angora	35
Figure.2.16. ver à soie	36
Figure.2.17. l'amiante.....	37
Figure.3.1 : Thermogrammes TGA (perte en poids) des composants des fibres végétales.....	42

Liste des figures et tableaux

Figure.3.2: les applications possibles à ce jour dans l'automobile	44
Figure 3.3 Biocomposites utilisés pour le decking – biosourcé Société Trex	46
Figure 3.4 Innobat - Matériau composite pour la fabrication de profilés de menuiseries.....	46
Figure.3.5 Vélo fabriqué à partir de Bambou	47
Figure 3.6 les applications des fibres naturelles d'origine animale.....	48
Figure.4.1 : Répartition mondiale annuelle de la production de fibres	54
Figure.4.2. Expansion du marché des bio composites.....	54
Figure.4.3 Usage de fibres naturelles dans l'automobile	54
Figure.4.4 - Évolution envisageable de la part des biocomposites dans le marché européen des composites 2010-2020	55

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Composition des fibres naturelles	20
Tableau 2.1. Principales caractéristiques physiques des fibres de jute	31
Tableau 2.2 classification scientifique de la plante Diss.....	33
Tableau 3.1 : Propriétés mécaniques des quelques fibres artificielles	38
Tableau 3.2: Propriétés mécaniques de différentes fibres	39
Tableau 3.3 : Propriétés mécaniques de différentes fibres naturelles et de la fibre de verre	40
Tableau 3.4 : Comparaison entre les fibres naturelles et les fibres de verre	40

Introduction générale

Un épuisement programmé des ressources fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel), le prix du pétrole qui augmente de manière constante et une prise de conscience au niveau mondial de la nécessité de limiter notre impact sur l'environnement créent un contexte favorable au développement de produits bio-sourcés (bio-composites) sur de nombreux marchés (matériaux d'isolation et de construction, peintures, cosmétique, emballages...). Dans le milieu des matériaux composites traditionnels, également pénalisé par d'importantes difficultés de recyclage, les clients et fournisseurs commencent à envisager d'autres scénarios...

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de plusieurs matériaux non miscibles pour former un nouveau matériau qui possède des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas. Ce matériau est constitué d'un renfort ou ossature qui permet la tenue mécanique et d'une matrice plastique (résine thermoplastique ou thermodurcissable) qui assure la protection chimique du matériau et transmet les efforts vers le renfort. Lorsqu'un composite est formé d'une matrice et/ou d'un renfort bio-sourcés (résine naturelle, fibres de bois, fibres de lin, amidon, cellulose...), il prend le nom de bio-composite, d'agro-composite (quand il y a utilisation de ressource agricole), ou encore de composite bio-sourcé [1].

Les avantages les plus importants des polymères sont la facilité de mise en œuvre, la productivité et la réduction des coûts. Pour de nombreuses applications, les propriétés des polymères sont modifiées en utilisant des renforts pour optimiser les propriétés mécaniques. Les matériaux polymères renforcés par des fibres synthétiques, comme les fibres d'aramide, les fibres de carbone ou les fibres de verres sont très utilisés dans divers domaines d'applications, comme ceux de l'automobile, de la construction, de l'aéronautique, et des sports. Les fibres de verres sont les plus utilisées grâce à leur faible coût, leur facilité de production et leurs propriétés mécaniques spécifiques importantes. Cependant, le problème rencontré lors de l'utilisation de ces matériaux vient de leurs impacts négatifs pour l'homme et pour l'environnement (allergie de la peau, cancer pulmonaire...etc.).

Introduction générale

Les composites renforcés de fibres naturelles ont donc attiré une attention de plus en plus grande en raison de leur faible coût, leur densité peu élevée, leur biodégradabilité et leur disponibilité, leur facilité de mise en œuvre, leur haut module spécifique, et leur capacité à être recyclés, etc. Ces avantages présentent de l'intérêt pour des applications dans divers domaines comme par exemple la vie quotidienne (mobilier, plancher, pots...), l'industrie automobile..., qui exigent des matériaux légers à haute performance, des possibilités de recyclage, le minimum d'impact sur l'environnement, et une réduction du coût de la matière [2].

Le présent mémoire est constitué de quatre chapitres le premier chapitre présente des généralités sur les bio-composites. Le deuxième chapitre illustre quelques exemples sur les bio-composites tandis que le troisième et quatrième chapitres traitant, respectivement, des propriétés et applications, du marché, des avantages et inconvénients et de l'impact environnemental des bio-composites

Enfin, une conclusion générale est donnée

CHAPITRE 1 :
GENERALITE SUR LES
BIO – COMPOSITES.

1.1. Introduction

Depuis les années 90, de nouveaux matériaux composites ont émergé dans le paysage industriel. Les matériaux composites ne cessent d'évoluer vers des produits qui sont, d'un côté soit les moins coûteux possible soit les plus performants, ou bien les deux à la fois et de l'autre côté ils doivent satisfaire les nouvelles exigences notamment celles relatives au respect de l'environnement.

1.2. Définition de bio composites

Les composites sont des matériaux solides anisotropes c'est-à-dire que leurs propriétés changent en fonction de la direction de leurs fibres. Ils correspondent à l'association de deux sous-parties non miscibles donc ce sont des composites non homogènes mais leurs sous-parties se complètent l'une l'autre. Ces deux sous-parties sont : tout d'abord le renfort, qui est responsable de la résistance mécanique et de la structure. En effet il joue le rôle d'armature par son aspect filamentaire. Ensuite, la matrice, dont la fonction est d'unir les filaments correspondants au renfort. Elle permet de répartir les forces et d'améliorer la résistance mécanique du renfort face aux compressions et aux étirements. On distingue deux types de matrices, les thermodurcissables à processus irréversible et les matrices thermoplastiques à processus réversible. On peut également les appeler des résines organiques. On retrouve des composites utilisés en odontologie avec des matrices dites organiques résineuses, d'où l'appellation de résine organique [3]. En plus de ces deux constituants de base on retrouve ce que l'on appelle une interface, qui assure la compatibilité renfort-matrice, en transmettant les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif [4].

Lorsqu'un composite est formé d'une matrice et/ou d'un renfort bio-sourcés (résine naturelle, fibres de bois, fibres de lin, amidon, cellulose...), il prend le nom de bio-composite, d'agro-composite (quand il y a utilisation de ressource agricole), ou encore de composite bio-sourcé [1].

1.3. Historique

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Égypte, où la paille et d'argile étaient mélangées pour construire des murs.

Les premiers matériaux composites créés par l'homme furent sans doute à base de bois. Un des tous premiers composites est l'arc traditionnel mongol qui date d'environ 2000 ans av. J.-C. L'âme de l'arc est en bois et contre collée de tendon au dos et de corne sur la face interne. Durant le moyen-âge, un matériau composite populaire pour la construction, le torchis, fut utilisé pour ses propriétés isolantes et son faible coût. En 1823, Charles Macintosh créa l'imperméable en imprégnant du caoutchouc sur du tissu. Par la suite, en 1892, Hennebique déposa un brevet sur un matériau très semblable au béton armé d'aujourd'hui.

Outre les fibres d'origines artificielles ou synthétiques, c'est-à-dire celles créées par l'homme, il y a plusieurs types de fibres d'origine naturelle. Comme mentionné plus tôt, les fibres naturelles ont sans aucun doute été les premières à être utilisées par l'homme [13].

Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries.

Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges [5,6].

1.4. Classification des bio composites

Les fibres naturelles peuvent être classées en fonction de leurs origines : animales, végétales ou minérales (**Figure 1.1**)

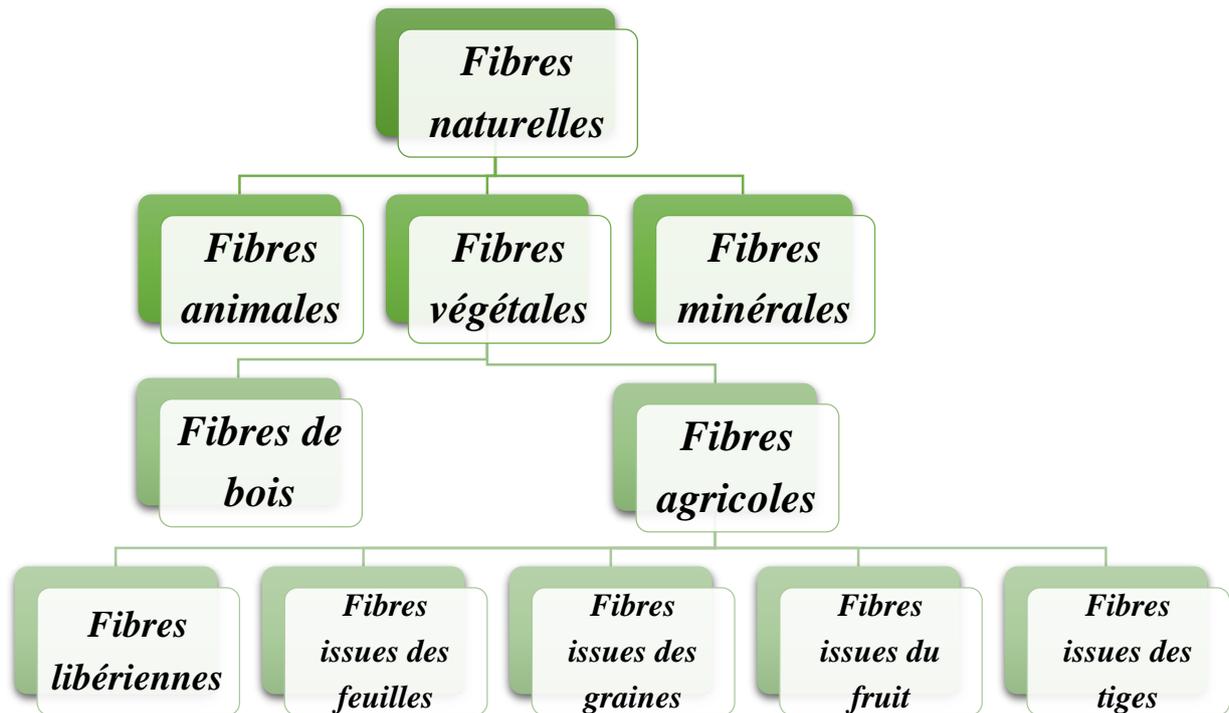


Fig. 1.1. : Classification des fibres naturelles [6, 7].

Catégories des fibres agricoles

Les principales catégories de fibres agricoles sont :

- Fibres libériennes : extraites de la partie extérieure de la tige (lin, chanvre, jute, kénaf, ramie...)
- Fibres extraites des feuilles : fibres de sisal, de bananier, de palmier...
- Fibres extraites de poils séminaux des graines : fibres de coton, de kapok...
- Fibres extraites de l'enveloppe du fruit : fibres de coco...
- Fibres extraites des tiges ou des troncs : paille de blé, de riz, d'orge ou d'autres cultures telles que le bambou...

1.5. La Composition des fibres naturelles

Les fibres végétales sont constituées de cellules individuelles ou cellules de base. La plupart des fibres naturelles sont multicellulaires formées en fait d'un faisceau de fibres individuelles. Par contre, le coton et le kapok ont chacun une unique cellule de base suffisamment longue pour être considéré comme fibre unicellulaire.

CHAPITRE I. GENERALITE SUR LES BIO – COMPOSITES.

Les cellules constituées de micro fibrilles cristallines à base de cellulose qui est un polymère semi-cristallin et reliées sur une couche entière de lignine amorphe tridimensionnelle et d'hémicellulose sont un vaste groupe de polysaccharides associés à la cellulose dans les parois cellulaires des plantes (**figure 1.2**). L'empilement de ces couches forme ainsi les parois cellulaires multicouches.

Les dimensions des cellules de base varient d'une fibre à l'autre. Cependant, ces derniers dépendent du degré de maturité de la partie de la plante pour la même fibre. On note aussi que les dimensions et l'arrangement des cellules individuelles ou de base déterminent l'ultra structure et les propriétés mécaniques des fibres.

En général, les cellules individuelles des fibres végétales présentent un vide central appelé lumen. La forme (circulaire, polygonale ou elliptique) du lumen dépend de l'origine de la fibre et de l'épaisseur de la paroi. Le lumen justifie en grande partie la faible densité et l'isolation acoustique et thermique de la fibre. Les différentes couches qui forment la paroi cellulaire sont facilement décelables par microscopie optique (**Fig.1.2**) [10].

Il existe aussi, en faible proportion, des constituants extractibles comme les protéines ou encore des composés inorganiques. La proportion d'holocellulose (comprenant la cellulose et l'hémicellulose) et de lignine varie selon les fibres naturelles et l'âge de ces fibres. La composition dépend de la condition de croissance, de l'âge du végétal, des conditions climatiques et bien sûr de la nature des fibres [8].

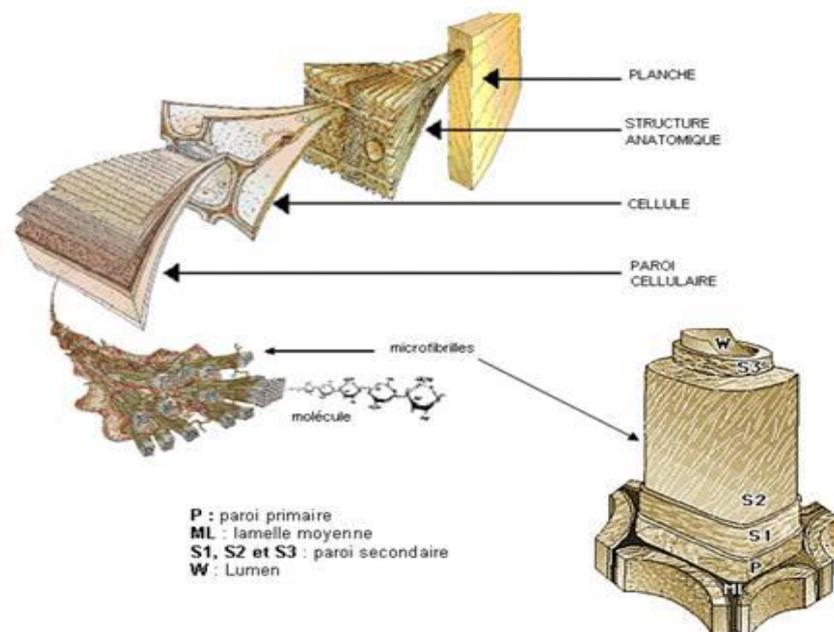


Fig 1.2 : Structure des fibres de bois d'après Harrington, [10]

Chaque fibre se présente sous la forme d'un composite multicouches dans lequel la lignine joue le rôle d'une matrice enrobant l'élément structurant très rigide qu'est la cellulose (**Figure1.3**).

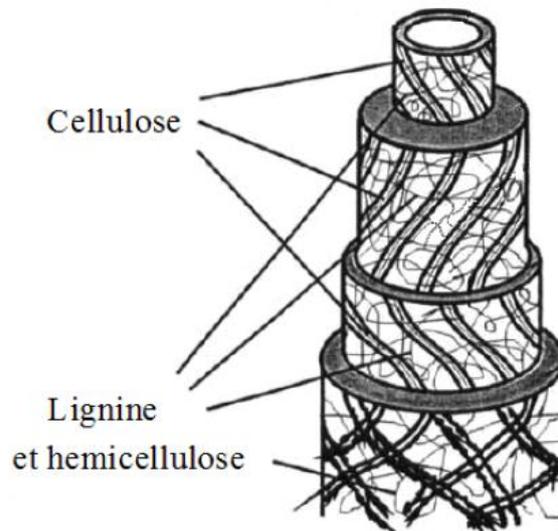


Fig 1.3 : Structure du bois [5].

Les fibres se classent en deux catégories principales : les fibres synthétiques et les fibres naturelles. Ces dernières, qui conduisent aux composites bio-sourcés, peuvent aussi être classées selon leur origine, végétale ou animale. La différence principale réside dans leur composition : les fibres végétales sont (le plus souvent) composées de (ligno-) cellulose et les fibres d'origine animale sont (le plus souvent) composées de protéines.

1.5.1. Composition et Structure des fibres végétales

Les fibres végétales sont composées principalement de (ligno-) cellulose, c'est-à-dire de cellulose (**Fig.1.4**), d'hémicellulose (**Fig.1.5**) et de lignine (**Fig. 1.6**).

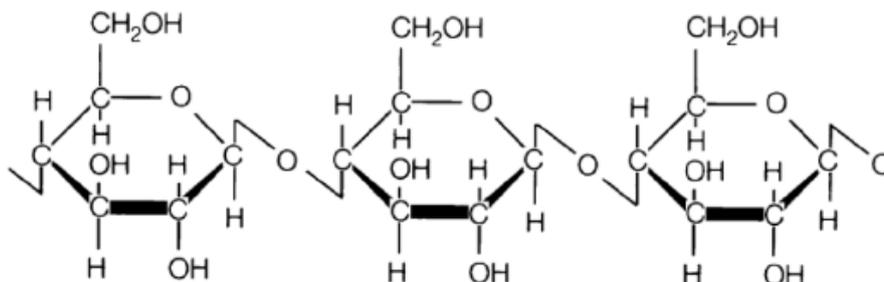


Fig.1.4. : structure chimique de la cellulose [8].

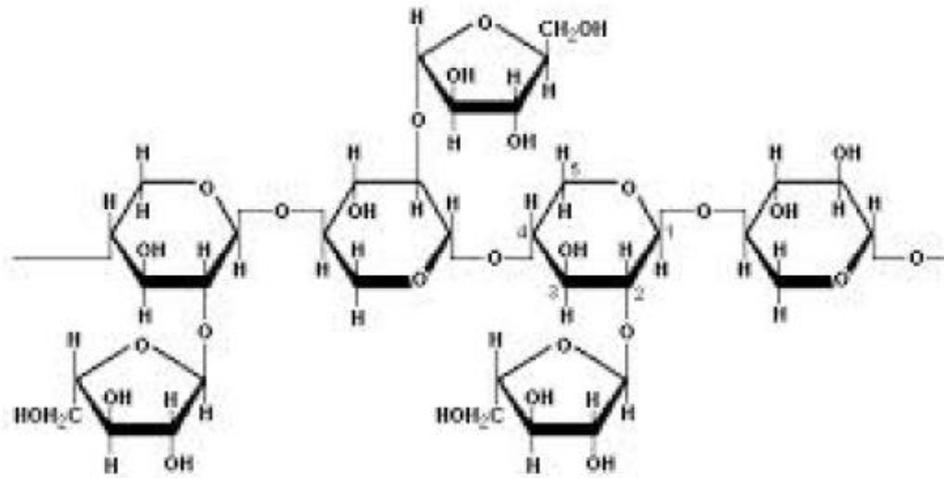


Fig. 1.5 : structure chimique d'une héli-cellulose [8].

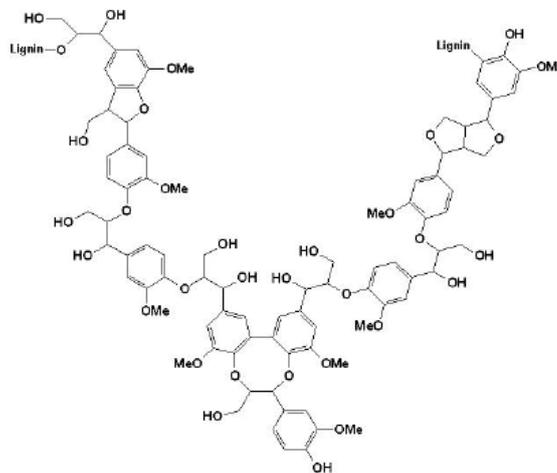


Fig. 1.6. structure chimique de la lignine [8].

Ces macromolécules sont présentes dans toutes les fibres végétales mais en proportions différentes. La **table 1.1** reprend une série de fibres végétales avec leur composition.

CHAPITRE I. GENERALITE SUR LES BIO – COMPOSITES.

Tableau 1.1 : Composition des fibres naturelles [8].

<i>Fibres</i>	<i>Cellulose</i> (%)	<i>Lignine</i> (%)	<i>Hémicellulose</i> (%)	<i>Pectine</i> (%)	<i>Cendre (%)</i>
<i>Fibres de tige :</i>					
<i>Bambou</i>	46-58	20-22	16-20	8-10	-
<i>Kénaïf</i>	37-49	15-21	18-24	-	2-4
<i>Jute</i>	41-48	21-24	18-22	-	0,8
<i>Fibres d'écorce / libériennes :</i>					
<i>Fibres de lin</i>					
<i>Kénaïf</i>	71	2,2	18,6-20,6	2,3	-
<i>Jute</i>	31-57	15-19	21,5-23	-	2-5
<i>Chanvre</i>	45-71,5	12-26	13,6-21	0,2	2-5
<i>Ramie</i>	57-77	3,7-13	14-22,4	0,9	0,8
<i>Ramie</i>	68,6-91	0,6-0,7	5-16,7	1,9	-
<i>Fibres de feuillage :</i>					
<i>Abaca</i>	56-63	7-9	15-17	-	3
<i>Sisal</i>	47-78	7-11	10-24	10	0,6-1
<i>Henequen</i>	77,6	13,1	4-8	-	-
<i>Coton</i>	92	-	6	-	-

1.5.2 Composition et Structure de fibres d'origine animale

Une famille de fibres animales est à base de protéines ; la soie produite par le ver à soie (*Bombyx mori*) en est un exemple. Elle est composée en majorité (70% - 80%) d'une protéine de haute masse moléculaire appelée fibroïne (**Fig.1.7**) dont les fibres sont agglomérées au moyen de l'autre constituant, la sérécine (20% - 30%). Elle comprend, en outre quelques autres

CHAPITRE I. GENERALITE SUR LES BIO – COMPOSITES.

composants minoritaires. La sérécine est une protéine de masse moléculaire beaucoup plus faible, composée majoritairement de sérine.

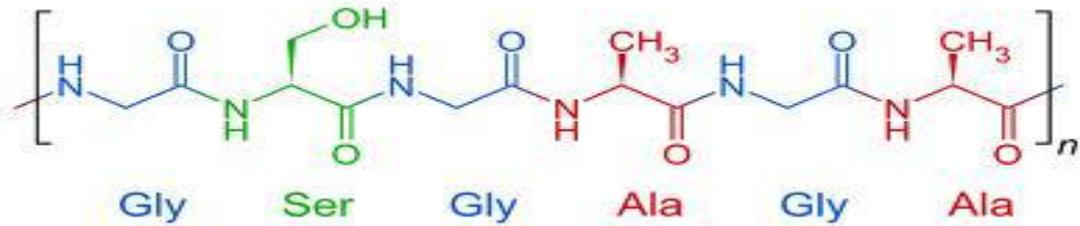


Fig. 1.7 : Structure chimique de la fibroïne [9].

Il faut aussi mentionner qu'il est possible d'extraire des fibres d'origine de la cuticule externe de certains insectes, de certains champignons et de levures, de la carapace de crustacés ou de céphalopodes. Un matériau à base de chitine, molécule dont la structure (**Fig. 1.8**) se rapproche de la cellulose.

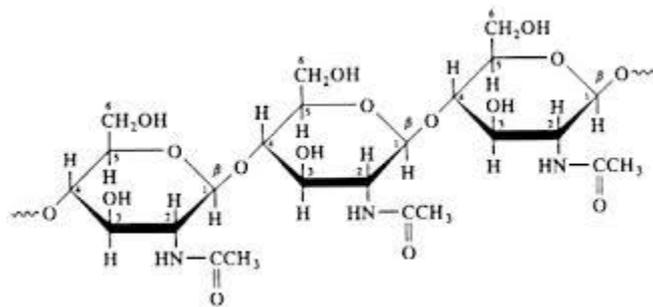


Fig.1.8 : Structure chimique de la chitine

1.5.3. Influence des paramètres externes

Un paramètre important des fibres d'origines végétales et animales est la variabilité de leurs compositions, donc, dans une certaine mesure de leurs propriétés, en fonction de paramètres externes comme les conditions climatiques, l'âge de la plante ou de l'animal, etc.

L'humidité ambiante, elle, influence directement leurs propriétés au moment de leur utilisation [9].

1.6. Extraction des fibres végétales

L'extraction de fibres végétales est un procédé classique. Le filage des fibres nécessite des transformations : extraction et purification la matière première ou brute en une forme filable.

Vu la diversité des matières brutes, le procédé d'extraction diffère d'un type à l'autre.

Pour le coton, les fibres sont sous une forme plus ou moins filable. Certains traitements sont indispensables (élimination des graines etc...).

Par contre, d'autres types se récoltent sous forme de tiges. Donc l'extraction des fibres ultimes (filables) est nécessaire. Au cours de l'extraction, on élimine les liants comme les pectines et la lignine. Les fibres obtenues sont appelées les fibres ultimes.

Selon la nature et le domaine d'utilisation des fibres, de différents types de traitements sont proposés : mécaniques, chimiques et biologiques (bactéries et enzymes).

Les différentes techniques d'extraction sont :

1.6.1. Rouissage biologique

C'est une méthode d'extraction traditionnelle. Le principe repose sur l'utilisation des bactéries de l'environnement pour dissoudre les extractibles. Certaines bactéries, telles que *Bacillus* et *Clostridium*, utilisées lors du rouissage à l'eau et certains champignons comme *Pusillus* et *Fusariuslaterium*, sont utilisées lors du rouissage à la rosée. Ces derniers se sont révélés très efficaces pour l'élimination des substances non cellulosiques des plantes et libérer la fibre. Malgré le temps d'extraction relativement long, le rouissage atmosphérique fournit des fibres de qualité. On note que le contrôle de la qualité de la fibre n'est pas aisé [10].

1.6.2. Rouissage chimique

Des solutions alcalines ou acides doux sont souvent utilisées pour le rouissage. L'introduction des enzymes accélère le processus de libération de la fibre. L'alcali le plus utilisé est la soude caustique. Les acides doux comme l'acide sulfurique et l'acide oxalique en combinaison avec un détergent sont aussi utilisés pour l'extraction des fibres. On note que la proportion des constituants de la solution de traitement détermine la qualité des fibres extraites.

A titre d'exemple, le procédé Kraft est utilisé pour délignifier de la matière cellulosique comme le bois. C'est une cuisson chimique de 2 heures dans une solution aqueuse (NaOH) et de sulfure

CHAPITRE I. GENERALITE SUR LES BIO – COMPOSITES.

de sodium (Na₂S) à la température de 170°C à 175°C. Les anions d'hydroxyde (OH⁻) et sulfuryl (SH⁻) dégradent la lignine, l'hémicellulose et les pectines par dissolution [11].

1.6.3. Rouissage mécanique

La séparation mécanique quant à elle utilise des machines à décortiquer : le vapocraquage, l'ammoniaque et le process Tilby. Cette dernière se révèle efficace notamment dans l'extraction des fibres de canne à sucre, de maïs et d'autres plantes cellulosiques. L'avantage de ce process est de réaliser une extraction sans désintégration des constituants [10].

La **fig. 1.9** résume la plupart des procédés de séparation des fibres utilisés de nos jours.

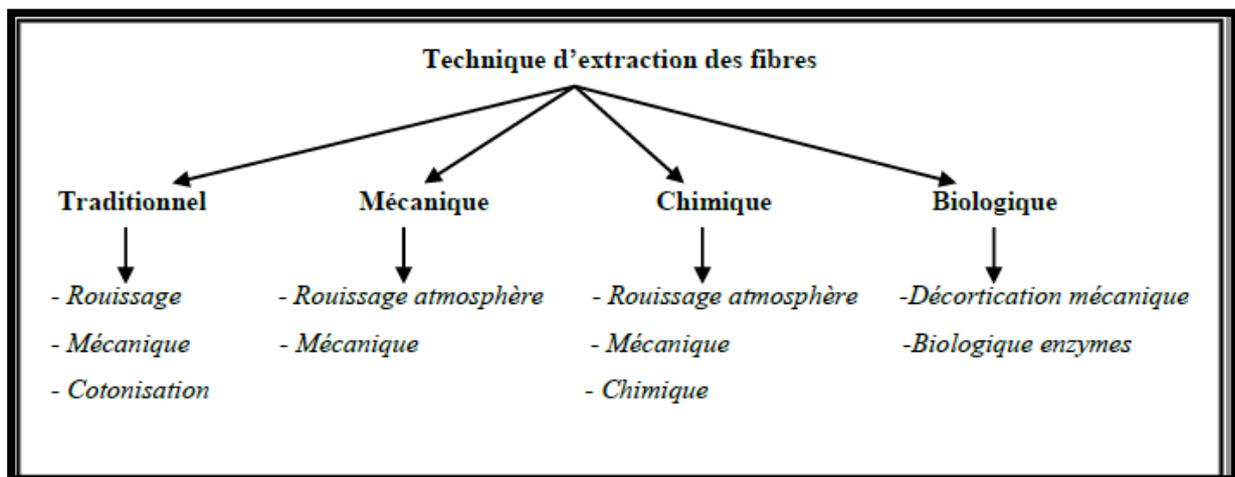


Fig. 1.9 : Diagramme des techniques d'extraction des fibres végétales. [12]

1.7. Composites à base de fibres naturelles

Comme pour tous les composites, il faut distinguer composites à matrice thermodurcissable et à matrice thermoplastique.

1.7.1. Composites à matrices thermodurcissables

Il est évidemment possible et actuellement pratiqué industriellement, de renforcer des résines thermodurcissables classiques, donc issues du pétrole, au moyen de fibres naturelles, et, en

CHAPITRE I. GENERALITE SUR LES BIO – COMPOSITES.

particulier, végétales. Néanmoins, certaines techniques devront être adaptées. Par exemple, il n'est pas possible d'obtenir de « rovings » de fibres naturelles continues, comme c'est le cas avec les fibres synthétiques. Néanmoins, pour autant que leur température de mise en œuvre ne dépasse pas 150°C, les résines « classiques » du type « époxy », polyuréthane, ou « polyester », peuvent être utilisées.

Un goulet d'étranglement est cependant encore observé au niveau de la disponibilité de résines thermodurcissables, bio-sourcées et adéquates. Lors du congrès « *On the road to a bio-based economy* » qui a eu lieu le 27 octobre 2011, à Elewijt en Belgique, ont été présentées des résines thermodurcissables bio-sourcées à base de furanne. L'alcool furfurylique utilisé pour sa fabrication est, en effet, bio-sourcé à 100 %.

Sur le plan commercial, SICOMIN a déjà lancé depuis quelques années une gamme de résines « vertes » GREENPOXY4 annoncées à plus de 50% d'origine végétale.

Dans la course vers des résines époxy bio-sourcées, la commercialisation d'une epichlorhydrine bio-sourcée est un pas important.

Des recherches sont toujours en cours pour réaliser des résines époxy mécaniquement efficaces à base d'huiles naturelles époxydées. D'autres recherches visent à remplacer le styrène dans les résines polyesters par des résines bio-basées, notamment à base d'*isosorbide*.

1.7.2. Composites à matrices thermoplastiques

Le problème principal de la réalisation de composites bio-sourcés à matrices thermoplastiques réside dans la résistance des fibres naturelles à l'étape de mise en œuvre à haute température. Le PLA est intéressant car commercialement disponible et relativement peu coûteux. L'amidon thermoplastique est également un bioplastique qui peut être choisi comme matrice de fibres naturelles car sa température de mise en œuvre est peu élevée. Ces polymères bio-sourcés présentent souvent des propriétés mécaniques insuffisantes et nécessitent des renforts.

Comme ils sont semi-cristallins, le renfort par des fibres naturelles est idéal car il augmente le taux de matière bio-sourcée du matériau [12]

Chapitre 2 :

Quelques exemples sur

Les bio – composites

2.1. Introduction

Plusieurs types de fibres naturelles sont utilisés dans le monde des matériaux composites. Les fibres les plus usuelles sont : le chanvre, le lin, jute, le kénaf, le sisal, la ramie, l’amiante et le palmier. Ce chapitre donne un aperçu sur quelque fibre naturelle .

2.2. Fibres naturelles d’origine végétale

2.2.1. Fibre de chanvre

2.2.1.1. Plante

La variété de chanvre développée pour sa fibre est le Cannabis, aussi appelée chanvre industriel. Cette variété possède une très faible teneur en THC A 9 tétrahydrocannabinol (moins de 0,2%). Le chanvre fait partie de la famille des Cannabinacées .c’ est une plante à croissance rapide qui peut atteindre environ 3 m de hauteur en quatre ou cinq mois. Le système de racines du chanvre est très développé autour d'une racine pivotante qui peut atteindre jusqu'à 2,5 mètres. Grâce à ce système racinaire, le chanvre prévient l'érosion des sols. La tige principale du chanvre a environ 1 à 3 cm de diamètre. Elle est très rarement ramifiée, creuse et cannelée. La morphologie finale du chanvre est très dépendante de l'espèce et de l'environnement. Les Figure 2.1 et 2 présentent l'aspect général de la plante.



Fig 2.1: Cannabis sativa L. [13].



Fig. 2.2 : Le chanvre [15]

Chapitre 2. Quelques exemples sur les bio – composites

La tige principale porte les feuilles regroupées en 3 à 11 folioles lancéolées inégales et dispersées en opposition à chaque 10 à 30 cm. Le chanvre cultivé pour sa fibre est principalement monoïque, c'est-à-dire que les fleurs femelles et mâles se retrouvent sur la même plante. Le fruit du chanvre, aussi appelé chènevis, est un akène de forme ovale. Il est de couleur gris-brunâtre et mesure de 3-5 mm de longueur. Le chènevis contient environ 20 à 25% de protéines et près de 35% d'acides gras. La tige du chanvre est composée de plusieurs sections comme le montre la Figure II.3. La partie extérieure est un épiderme protecteur. Par la suite, il y a les tissus parenchymateux qui sont entre autres impliqués dans les fonctions métaboliques de la plante. Ensuite se trouvent les fibres riches en cellulose regroupées en faisceaux fibreux. Ce sont ces fibres qui sont intéressantes pour leurs propriétés mécaniques.

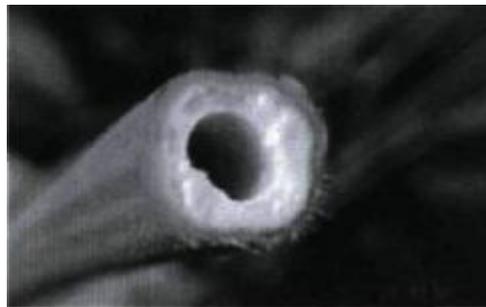


Fig. 2.3 : Tige du Cannabis sativa L [13].

2.2.1.2. Historique

Le chanvre côtoie l'homme depuis l'époque néolithique. Ce fut sans doute une des premières plantes domestiquées par l'homme pour ses fibres. Les premières utilisations des fibres par l'homme furent pour se vêtir et les graines du chanvre, très riches en acides gras polyinsaturés, étaient consommées. Par la suite, le chanvre fut utilisé pour produire du papier. En effet, le plus vieux morceau de papier est daté entre 140 et 87 avant J.-C. et était un mélange d'écorces de mûrier et de fibres de chanvre. La première bible imprimée par Gutenberg l'aurait été sur du papier de chanvre. Au moyen-âge, la fibre de chanvre servait principalement à se vêtir. Les vêtements royaux occidentaux étaient un mélange de fibres de chanvre et de lin. Les voiles et les cordages des navires à voiles étaient initialement constitués de fibres de chanvre. Au début du 20^e siècle, le coton a progressivement remplacé le chanvre dans l'industrie du textile, réduisant grandement les superficies cultivées (de 176000 ha en France au milieu du 19^e siècle

Chapitre 2. Quelques exemples sur les bio – composites

à 700 ha en 1960). Le chanvre a connu un regain de popularité avec les guerres à cause de la résistantes de ses fibres [13].

2.2.1.3. Propriétés

Les fibres de chanvre ont des propriétés comparables aux autres fibres techniques.

2.2.1.3.1. Propriétés mécaniques

Un procédé mis au point par AFT Plasturgie en France permet d'obtenir avec le chanvre un renforcement voisin de celui que l'on obtient avec la même masse de fibres de verre. Avec une teneur de 30%, on atteint la rigidité extrême d'un compound polymère, mais en revanche le matériau devient plus cassant. Les propriétés de tenue au choc peuvent être nettement améliorées par un traitement avec un agent compatibilisant.

2.2.1.3.2. Propriétés thermiques

La tenue thermique des polymères est très nettement améliorée par l'incorporation de fibres de chanvre. La valeur HDT (heat deflection temperature ; température de déflexion thermique) d'un polypropylène passe de 90 °C à 145 °C lorsqu'il est compoundé avec 30% de chanvre. De même, le point de ramollissement Vicat du PVC est augmenté de 5°C dans les mêmes conditions.

2.2.1.3.2. Isotropie des propriétés

Les fibres de verre sont orientées dans les flux matière ; selon que l'écoulement est laminaire ou turbulent, elles s'orientent parallèlement ou perpendiculairement au flux entraînant donc une anisotropie des propriétés. Les fibres de chanvre, elles, ne sont pas orientées dans les flux. Les pièces obtenues ont donc des propriétés isotropiques [14].

2.2.2. Fibre de Lin

Le lin appartient à la famille des linacées (Figure II.4). C'est une plante annuelle dont la tige atteinte de 0,60 à 1,20 m de hauteur pour un diamètre de 1 à 3 mm [35], [36]. Le lin textile est une culture septentrionale. En Europe, on le trouve en Russie, en Pologne, en Belgique et en France (principalement en Normandie). Le lin est soit coupé, soit arraché. On récupère la

Chapitre 2. Quelques exemples sur les bio – composites

matière textile qui se trouve être la tige de la plante, sous forme de faisceaux qui constituent la fibre technique. Cela requiert trois opérations : le rouissage, le teillage et le peignage. La cellule élémentaire (ou « fibre ultime D ») de lin apparaît comme un cylindre imparfait polygonal, généralement à six côtés, comportant éventuellement un lumen (cavité centrale d'une fibre végétale) [16].



Fig. 2.4 : le lin [15]

2.2.3. Fibre de Ramie

La ramie est un arbuscule de la famille des urticacées (en anglais China grass). Il se présente sous la forme d'une touffe formée de tiges d'environ 1,5 à 3 m de hauteur avec de grandes feuilles (Figure II.5). L'extraction de la fibre nécessite un décorticage et un dégomunage très poussés. La cellule élémentaire, ressemblant davantage à celle du coton qu'à celle du lin, peut atteindre 17cm de longueur ; elle présente une concentration en cellulose importante, une haute cristallinité et un degré de polymérisation élevé. Sa blancheur et son aspect soyeux la destinent à l'habillement [16].



Fig. 2.5 le Ramie [39]

2.2.3. Fibre de Sisal

Ses fibres sont extraites des feuilles de la plante sisal (*agave sisalana*) (Figure II.6). Originnaire de Yucatan, elle est produite en Amérique du sud, en Afrique, aux Antilles et en Extrême Orient

Chapitre 2. Quelques exemples sur les bio – composites

[18]. Les fibres sont surtout extraites de la périphérie de la feuille. Un plant de sisal produit environ 200.à 250 feuilles et chaque feuille contient 1000 à 1200 paquets de fibres. Les méthodes de traitement pour l'extraction des fibres de sisal sont le rouissage et le teillage. Les fibres sont ensuite lavées à grande eau pour enlever les déchets en surplus [17].



Fig. 2.6 : sisal [15]

2.2.5. Fibre de Coir de la noix de coco.

Le cocotier (*Cocos nucifera*) est un palmier poussant dans les pays tropicaux. Les fibres sont prélevées dans le coir (mésocarpe fibre) de la noix de coco et sont utilisées en corderie et en sparterie [16].



Fig 2.7 Le coco [15]

2.2.6. Fibre de Kénaf (ou *Hibiscus hema*)

Il provient d'une plante, appelée aussi Dah, cultivée aux Indes, en Afrique et dans l'île de Java. (Figure 2.8) D'une couleur blanche dorée, la fibre de kénaf a des qualités comparables à celles du jute [16].



Fig. 2.8 : Les Fibres de Kenaf [38]

Chapitre 2. Quelques exemples sur les bio – composites

2.2.7. Fibre de Jute.

Le jute est une plante des régions tropicales (genre *Corchorus*) appartenant à la famille liliacées. La tige atteint une hauteur de 4 à 6m avec un diamètre d'environ 3 cm (Figure II.9). Le jute pousse essentiellement au Bangladesh qui détient un quasi-monopole de son commerce. Le jute est une plante herbacée de la famille des Malvacées. Il vient en deuxième position, après le coton, en termes de volume de production et d'utilisation. Le jute est très polyvalent [10]. Il en existe deux variétés (une blanche et un rouge), ce qui exige un triage préalable avant l'utilisation. La fibre ultime est très courte et très lignifiée. C'est une fibre libérienne, extraite des tiges de deux espèces végétales de la famille des Tiliacées : *Corchorusolitorius* et *Corchoruscapsularis* [10]. L'extraction de la fibre technique est obtenue par rouissage et décorticage. Après le rouissage, on détache la fibre, on nettoie la filasse et on rince à l'eau [19], [20].



Fig. 2.9. Plante de jute Typique **a**, **b** et **c** botte de fibres extraite de la tige de jute. [10]

La fibre de jute est constituée de 80 à 87 % de cellulose, le reste est de lignine. La longueur est de 1 à 5 mm et le diamètre est de 20 à 25 μm . Elle résulte de l'assemblage d'une dizaine ou plus de fibres élémentaires à section polygonale avec une ouverture centrale. Ces fibres sont ensuite tressées ou filées pour former les brins (**Fig.2.10**).



Figure 2.10 : Portion d'une section verticale de fibre de jute (**a**), amas de fibre (**b**), et brins tressé et filé (**c**) [10]

Chapitre 2. Quelques exemples sur les bio – composites

Les principales caractéristiques physiques des fibres de jute sont présentées dans le **tableau 2.1**

Tableau 2.1. *Principales caractéristiques physiques des fibres de jute [10]*

<i>Longueur de la fibre [mm]</i>	2.5
<i>Masse volumique g/cm³</i>	1.48-1.50
<i>Reprise en humidité (20°C – 65% HR) [%]</i>	16 - 18
<i>Taux de sorption d'eau [%]</i>	25.4
<i>Ténacité à sec [N.Tex-1]</i>	0,3 – 0,6
<i>Perte de Ténacité au mouillé (%)</i>	Gain de 15 – 25
<i>Résistance aux UV</i>	Moyen
<i>Résistance aux micro-organismes</i>	Moyen

La transformation des fibres de jute en fils passe par différentes opérations [10] :

- Ouverture du jute
- Ensimage : projection d'une émulsion d'huile dans l'eau sur le jute servant à humidifier les fibres et de permettre un meilleur glissement des fibres les unes sur les autres
- Obtention des fibres de longueur régulière par cardage.
- Parfaire le parallélisme des fibres par étirage.
- Filage et mise en forme en Rolls.

2.2.8 Fibre d'Alfa

L'Alfa se présente sous forme d'une feuille enroulée (Figure II.7). D'après Hattali et al [22] l'Alfa de l'Algérie est constitué de 14.9% de lignine, 38.5% d'hémicellulose et de 45.5% de cellulose L'Alfa est abondante en Algérie. Elle est intéressante du point de vue économique. Cela permet d'envisager son utilisation (autre que la production du papier) pour l'élaboration des matériaux composites à renfort végétal [21].



Fig. 2.11. L'Alfa [40]

2.2.9. Fibre de Bambou

Parmi les fibres naturelles, les fibres de bambou (Figure II.12) attirent de plus en plus l'attention des chercheurs. En effet, un des avantages des fibres de bambou est que c'est une ressource abondante en Asie et en Amérique du Sud. On peut les trouver également en moins grande quantité sur les autres continents. De plus, sa croissance est très rapide, environ 20 cm par jour et 20 m en 6 mois. Il est mûr en 4 ans mais est utilisable après une année de croissance [2].



Fig.2.12 Le bambou Đang Ngà [2]

2.2.10. Fibre de diss (*Ampelodesmos mauritanicus*)

L'*Ampelodesmos* est un monotypique genre d'herbe contenant la seule espèce (Figure 2.13). Il est connu sous le nom commun Stramma, Mauritanie herbe, l'herbe corde et l'herbe diss. Le nom vient du grec *ampelos*, "vigne", et *Desmos*, "obligations", de son utilisation ancienne pour l'attache des vignes [33]. Pour *mauritanicus*, on peut raisonnablement supposer qu'il est

Chapitre 2. Quelques exemples sur les bio – composites

originaires de Mauritanie (Afrique). Le tableau II.2 regroupe la classification scientifique de la plante : **Tableau 2.2 classification scientifique de la plante Diss. [33]**

Genre	Espèce	Sous-famille	Famille	Ordre
<i>Ampelodesmos</i>	<i>A .mauritanicus</i>	<i>Stipoideae</i>	<i>Poaceae</i>	<i>Poales</i>

La fibre de Diss (*Ampelodesmos mauritanicus*), est une herbe vivace. Elle existe en abondance à l'état sauvage sur le pourtour du bassin méditerranéen et l'Asie occidentale et au sud-ouest de l'Amérique du Nord. Elle était utilisée auparavant dans la réalisation des habitations anciennes en raison de ses qualités mécaniques et hydriques et en tant que fibre pour la fabrication de tapis. Cette herbe pousse mieux dans des sols sableux, caillouteux ou argileux qui sont modérément humides. Sa hauteur peut atteindre 3 mètres environ. L'utilisation de cette herbe dans les composites permet de préserver les ressources non renouvelables et d'ouvrir de nouveaux marchés.



Figure. 2.13. Herbe de Diss *Ampelodesmos mauritanicus*. [34]

Le Diss n'est pas suffisamment étudié. Il y a peu de références bibliographiques traitant cette herbe. Les fibres de Diss présentent une surface rugueuse, à relief très irrégulier avec la présence d'épines ou de crochets (0.20mm de longueur). A l'intérieur, la fibre est constituée d'un certain nombre de cavités. Le traitement à l'eau bouillie n'affecte pas la structure extérieure de la fibre, puisque les épines restent intactes [10].

2.3. Fibres naturelles d'origine animale

2.3.1. Fibre d'alpaga

L'alpaga est un animal domestiqué appartenant à la famille des camélidés d'Amérique du Sud. (Figure 2.14) Le cheptel comprend 3 millions de têtes environ, que l'on trouve essentiellement dans les Andes et dans des élevages en Amérique du Nord, en Europe et en Australie. L'alpaga constitue l'une des sources les plus variées de fibres animales, il existe deux types de poils et une gamme variée de couleurs naturelles. Les alpagas *huacayos* donnent une fibre courte, douce et abondante, tandis que celle des *suris* est soyeuse, éclatante et raide. Ces fibres servent à fabriquer des tissus de luxe de haute qualité. La production mondiale est estimée à environ 5 000 tonnes par an [46].



Fig.2.14. L'Alpaga [46]

2.3.2. Fibre de L'angora

La laine blanche et soyeuse **des lapins angora (Figure 2.15)**, prisée pour sa finesse et sa souplesse, est mélangée à d'autres fibres naturelles pour fabriquer des lainages et des tissés de grande qualité. L'élevage de lapins est pratiqué sur de grandes exploitations ou bien à faible échelle par de petits producteurs. Tous les trois mois, on récupère la toison des lapins par tonte, peignage ou épilation. Il étouffe si on ne le fait pas. La Chine est le premier producteur mondial d'angora (90 pour cent de la production mondiale), suivie de loin par l'Argentine, le Chili, la République tchèque, la France et la Hongrie



Fig.2.15. lapin angora [46]

Chapitre 2. Quelques exemples sur les bio – composites

2.3.3. Fibre de cachemire

La laine de cachemire, qui provient du poil très fin de **la chèvre du Cachemire** *Capra hircus laniger*, est très douce au toucher; bien que d'une grande légèreté, elle tient très chaud. Comme elle est rare, elle est considérée comme une fibre de luxe. Jusqu'à une période récente, la plupart des vêtements en cachemire étaient fabriqués en Europe, aux États-Unis et au Japon, mais de nos jours c'est la Chine qui est de loin le plus gros producteur de cachemire brut, de cachemire fin et de vêtements en cachemire. La production mondiale de fibre de cachemires bruts est estimée à 15 000 tonnes par an [46].

2.3.4. Fibre de Ver à soie

La soie du ver à soie est utilisée par l'homme depuis des siècles. Le fil de soie est formé par la sécrétion séchée d'un insecte sérigène, comme le ver à soie du mûrier (*Bombyx mori*) (Figure 2.16). Lors de la transformation de la chenille en papillon, la chenille confectionne un cocon. Elle sécrète une bave filamenteuse dans laquelle elle s'enroule. Le cocon terminé comporte une trentaine de couches de fil. À l'intérieur, l'insecte se transforme en chrysalide, puis en papillon et quitte le cocon. Les insectes sont tués avant l'ouverture du cocon, et le fil de soie débobiné. On le considère comme le seul fil continu fourni par la nature et il se compose de filaments d'une longueur comprise entre 800 m et 1 200 m. Cette sécrétion est composée de deux substances ; la fibroïne (75 à 80 %), accolée par un ciment : le grès (20 à 25 %) ; d'où le nom de soie grège. La soie sauvage, telle la soie tussah, est produite par des chenilles non domestiquées (*Antherea Pernyi*). La fibre de soie a une section triangulaire, ce qui confère aux tissus de soie des qualités spéciales de réflexion... [42]



Fig.2.16 ver à soie [43]

2.4. Fibres naturelles d'origine minérale (L'amiante)

L'amiante (Figure 2.17) est un silicaté fibreux, inaltérable au feu, doté de propriétés mécaniques et d'isolation qui ont justifié son usage industriel.

Il y a deux variétés d'amiante :

- ✓ la serpentine qui ne comporte qu'une espèce cristalline, le chrysotile
- ✓ les amphibobes qui comportent cinq espèces : anthophyllite, amosite, actinolite, trémolite et crocidolite

Les fibres d'amiante sont fines, de longueur variable (certains diamètres sont 2 000 fois plus petits que celui d'un cheveu...).

Le 1er janvier 1997 à Québec , un décret a interdit la fabrication, l'importation, la mise sur le marché national, l'exportation, la détention en vue de la vente, l'offre, la vente et la cession à quelque titre que ce soit de toutes variétés de fibre d'amiante et de tout produit en contenant [45].



Fig.2.17 l'amiante [44]

Caractéristiques de l'amiante

L'amiante a les caractéristiques suivantes : incombustibilité, imprutrescibilité, résistance à la chaleur et isolation thermique, résistance à la corrosion, résistance mécanique élevée, très grande durabilité, affinité avec le ciment et d'autres liants [45].

Chapitre 3 :
Propriétés des fibres et leur
applications

Chapitre 3. Propriétés des fibres et leurs applications

3.1. Introduction

Malgré leurs très grandes différences en termes de propriétés mécaniques, les fibres naturelles sont intéressantes comme renfort dans un matériau composite. Il est certain que les fibres naturelles n'ont pas les mêmes propriétés mécaniques que les fibres artificielles. Il n'en demeure pas moins que dans certaines applications spécifiques, comme par exemple en flexion ou en traction comme ce peut être le cas pour des patios ou des poutres en composites utilisées dans les bancs de parc, elles sont intéressantes. Néanmoins, les fibres naturelles se défendent très bien et peuvent même rivaliser avec les fibres artificielles [13].

3.2. Propriétés

3.2.1. Propriétés physiques et mécaniques des fibres naturelles et artificielle

Les fibres végétales sont anisotropes. Le rapport entre la rigidité longitudinale et la rigidité transverse est d'environ 10.

Selon l'origine et le mode de fabrication, les fibres de cellulose ont un diamètre allant de 15 à 30 μm . Elles sont très rigides et sont considérées comme de bons isolants thermiques et acoustiques. Elles présentent également de bons adsorbants. La conformation spatiale de la cellulose détermine ses propriétés physiques et chimiques [10] Les principales caractéristiques physiques des fibres naturelles et artificielles sont regroupées dans les tableaux 3.1 à 3.4.

Tableau 3.1 : Propriétés mécaniques des quelques fibres artificielles [27].

Type de fibre	Module de traction (MPa)	Module d' Young (GPa)	Masse volumique (g/cm ³)
Kevlar 29	2700	59	1,44
Kevlar 49	2900	127	1,45
Fibre de carbone I	2000	400	1,95
Fibre de carbone II	2600	260	1,75
Fibre de verre	2500	70	2,60
Acier	4000	200	7,80

Chapitre 3. Propriétés des fibres et leurs applications

Tableau 3.2 : Propriétés physiques et mécaniques de différentes fibres [28].

<i>Fibre</i>	<i>Masse volumique (g/cm³)</i>	<i>Diamètre (µm)</i>	<i>Module de traction (MPa)</i>	<i>Module de Young (GPa)</i>	<i>Elongation à la rupture (%)</i>
<i>Jute</i>	1,48 - 1,5	20 - 200	393 - 773	13 - 26,5	7,1-8
<i>Lin</i>	1,5-3	-	45-1100	27,6	2,7 - 3,2
<i>Chanvre</i>	-	-	690	-	1,6
<i>Ramie</i>	1,5	-	400 - 938	61,4-128	1,2 - 3,8
<i>Sisal</i>	1,45	50 - 200	468 - 640	9,4 - 22	3,1-7
<i>Palme</i>	-	20-80	413 - 1627	34,5-82,51	1,6
<i>Coton</i>	1,5- 1,6	-	287 - 800	5,5- 12,6	7,1-8
<i>Coir</i>	1,15	100-450	131 - 175	4,1-6	15-40
<i>Fibre de verre</i>	2,5	-	2000 - 3500	70	2,5
<i>Fibre d'acier</i>	2,5	-	4570	86	2,8
<i>Aramide</i>	1,4	-	3000-3150	63-67	3,3 - 3,7
	1,7	-	4000	230 - 240	1,4-1,8

Chapitre 3. Propriétés des fibres et leurs applications

Tableau 3.3 : Propriétés physiques et mécaniques de différentes fibres naturelles et de la fibre de verre [13]

	Fibres							
	Fibre de verre	Chanvre	Jute	Ramie	Coir	Sisal	Lin	Conton
<i>Module d'élongation (GPa)</i>	73	70	10-30	44	6	38	60-80	12
<i>Elongation à la rupture (%)</i>	3	1,6	1,8	2	15-25	2-3	1,2-1,6	3-10
<i>Absorption d'humidité (%)</i>	-	8	16	12-17	10	11	7	8-25

Chapitre 3. Propriétés des fibres et leurs applications

Tableau 3.4 : Comparaison entre les fibres naturelles et les fibres de verre [13]

	<i>Fibre Naturelle</i>	<i>Fibre de verre</i>
<i>Masse volumique</i>	Faible	Le double des fibres naturelles
<i>Coût</i>	Faible	Faible mais plus élevé que les fibres naturelles
<i>Renouvelabilité</i>	Oui	Non
<i>Recyclabilité</i>	Oui	Non
<i>Dépense d'énergie</i>	Faible	Elevé
<i>Distribution</i>	Large	Large
<i>Carbone - neutre</i>	Oui	Non
<i>Abrasion des machines</i>	Non	Oui
<i>Risque à la santé</i>	Non	Oui
<i>Biodégradable</i>	Non	Oui

Chapitre 3. Propriétés des fibres et leurs applications

3.2.2. Propriétés thermiques des fibres naturelles

Un des problèmes majeurs posés par les fibres naturelles d'origine végétale est leur résistance limitée à la température. Le thermo gramme repris à la Figure 3.1 montre que la cellulose se dégrade au-dessus de 250°C. La lignine se dégrade très significativement dès 180°C. En réalité, des décolorations et de pertes de poids sont aussi observées sur la cellulose dès 200°C.

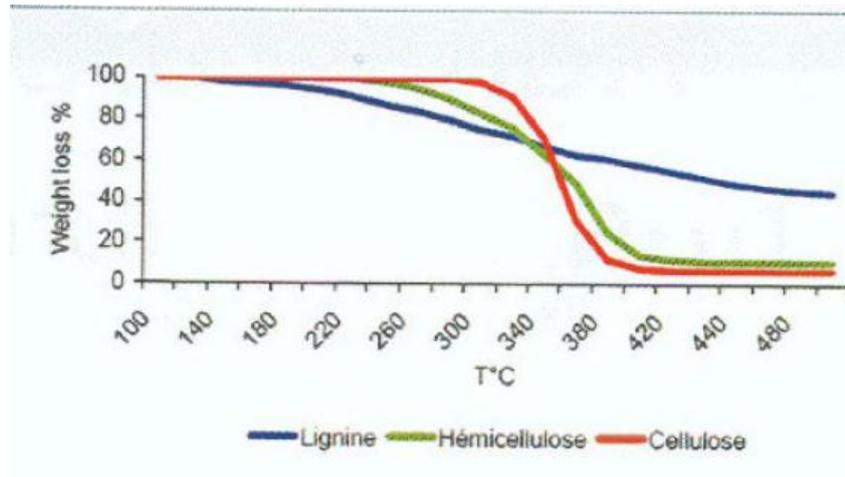


Fig.3.1 : Thermo grammes (perte en poids) des composants des fibres végétales [9].

Toutes les fibres végétales sont sensibles à la chaleur. Les plus résistantes sont le coton, le kénaf et le chanvre. La faible résistance des fibres végétales à toute élévation de température limite leur usage comme renforts de composites thermoplastiques à des matrices à faible température de fusion (<200°C) comme le HDPE, le PP, le PLA [9].

En outre les propriétés des fibres et leur structure dépendent de plusieurs facteurs tels que le milieu de leur croissance (climat et âge des plantes). Le lavage mécanique de la fibre est un facteur important vis-à-vis de la structure et des propriétés. La nature hydrophile des fibres cellulosiques est néfaste pour leur utilisation comme renforts dans les plastiques. La teneur en humidité de la fibre dépend de la teneur en constituants non cristallins, de la porosité. Dans les conditions standards, elle peut atteindre 10% (du poids total).

D'une manière générale, les fibres libériennes issues du phloème (lin, ramie, chanvre et kénaf) sont les plus rigides et les plus résistantes. Les fibres dures plutôt lignocellulosiques (sisal, abaca et hennequin) ont un module de traction intermédiaire. Les fibres de paille de blé possèdent de plus faibles rigidités et résistances en traction.

Le comportement mécanique en traction des fibres végétales est souvent non linéaire.

Chapitre 3. Propriétés des fibres et leurs applications

Par ailleurs, les propriétés mécaniques (module d'Young et la résistance à rupture) dépendent du diamètre de la fibre [29]. Il a été mentionné que ces propriétés peuvent être corrélées avec la teneur en cellulose et l'angle de spirale.

L'étude de diverses fibres de lin, et d'ananas montre que la résistance à la traction des fibres de lin est fortement dépendante de la longueur des fibres comparées aux fibres de verre. Par contre, la résistance à la traction des fibres d'ananas est moins dépendante. Cependant, la dispersion observée pour ces deux types de fibres se situe dans un intervalle dont la largeur est de l'ordre de l'écart-type. Cette dépendance résistance / longueur pourrait être observée comme le degré d'homogénéité ou la quantité d'impuretés des fibres. La résistance à la traction est en outre dépendante du raffinage de la fibre [10].

3.3. Facteurs influençant la caractérisation des fibres végétales

Lors de la caractérisation mécanique des fibres végétales, plusieurs facteurs peuvent influencer. Parmi ces facteurs on cite : section, la structure, l'humidité et la température.

3.3.1. Effet de l'humidité et de la température

La présence d'eau et la température de service influent grandement sur les propriétés mécaniques [32]. Il a été rapporté que : la rigidité diminue avec le taux d'absorption d'eau. L'eau absorbée s'infiltre dans les pores et les régions amorphes des fibres. Cette absorption réduit la cohésion entre les micro-fibrilles et agit comme un plastifiant en transformant la matrice pectique en un gel presque fluide. En plus, l'humidité provoque la formation de champignons à la surface de la fibre après seulement 3 jours d'exposition.

L'augmentation de la température altère les propriétés mécaniques des fibres. Cette augmentation conduit à l'évaporation de l'eau de la fibre entraînant la réduction de la cohésion de la structure. D'autre part les déformations thermiques, engendrent des fissures et par conséquent des endommagements irréversibles [10].

Chapitre 3. Propriétés des fibres et leurs applications

3.3.2. Aspect statistique

Les propriétés mécaniques des fibres végétales présentent une nette dispersion. Plusieurs causes sont à l'origine de cette dernière. La variété, le mode de culture et le climat influent notablement sur les propriétés intrinsèques. Les traitements mécaniques infligés aux tiges après leur maturité contribuent aussi à cette dispersion. Donc, la rupture des fibres est en général provoquée par la présence aléatoire de défauts qui se traduit par une dispersion importante des contraintes de rupture. L'analyse statistique est indispensable pour le traitement des résultats des essais mécaniques. La résistance à la traction d'une fibre végétale est alors à l'évidence aléatoire et, la distribution statistique des résistances sera donc fonction de la longueur et de la section de la fibre donnant lieu respectivement à des effets d'échelle de longueur et de section.

Lorsque l'on s'intéresse à la distribution statistique des résistances en fonction de la section, la réponse est moins facile. La réponse à cette question dépend de la distribution statistique des résistances le long des fils [10].

3.4. Les applications

3.4.1. Automobile et transport

Le secteur des transports a notamment de fortes attentes en termes d'allègement des véhicules (limitation de la consommation) et d'absorption des vibrations / insonorisation pouvant être satisfaites par les bio-composites. L'utilisation de ces derniers peut également permettre une valorisation de l'image écologique pour les marques. Pour ces raisons, les constructeurs et grands équipementiers s'intéressent aux matériaux verts (chanvre, miscanthus, fibre de bois, lin...). Mais après une phase de premiers test et référencements, le modèle économique reste à valider pour répondre aux impératifs de la filière.

Parmi les 2 à 3 kg de fibres de verre utilisés dans une voiture, quelques pièces composites bénéficient d'une substitution par du chanvre (platine de rétroviseur, bouchon de dégazage).

Les applications possible à ce jour dans l'automobile (Figure 3.2) : garnitures de porte, de coffre, plages arrières [1].



Fig.3.2 : les applications possibles à ce jour dans l'automobile [22]

3.4.2. Bâtiment / Construction / Aménagement de la maison

Dans le secteur du bâtiment et de la construction, les produits à base d'agro-matériaux développés et utilisés sont encore peu techniques et peu basés sur des composites. Les bio-composites se retrouvent cependant dans ces quelques applications qui s'intéressent à la légèreté de ces nouveaux matériaux et/ou à leurs avantages comparé au matériau bois (imputrescible, résistance aux intempéries, sans entretien, sans altération des couleurs...).

3.4.2.1. Isolation

Principalement des composites à base de chanvre ou de laine de lin et renfort utilisation de chanvre, bois, bois de lin dans les bétons légers et mortiers.

3.4.2.2. Profilés pour terrasses, sols et bardage

Les applications représentent un marché en développement en Europe et devraient dans les prochaines années représenter un volume très important (valorisation de matières premières secondaires comme le polyéthylène téréphtalate (PET) et de co-produits bois)

- ✓ profilés de decking (planchers de terrasses, profilés extérieurs, ...)
- ✓ profilés de siding (éléments de bardage, bordure de piscine)

Chapitre 3. Propriétés des fibres et leurs applications

3.4.2.3 Profilés pour fenêtres, portes, plinthes, moulures

Les acteurs du design et du luxe s'intéressent également aux bio-composite pour des questions esthétique, de toucher, de possibilité dans les formes (Figure III.3 et 4). Même si cela représente un marché de niche vraisemblablement limité en volume et dans le temps, l'effet communication n'est pas à négliger pour ces biomatériaux car les designers sont considérés comme précurseurs dans l'utilisation de nouveaux matériaux avant acceptation et utilisation par l'industrie.



Fig 3.3 Bio-composites utilisés pour le decking –
sourcé Société Trex [24]



Fig 3.4 Innobat - Matériau composite bio-
pour la fabrication de profilés de
-menuiseries [25]

3.4.3 Sports & loisirs

Il existe aujourd'hui des produits en bio-composites commercialisés sur le marché (raquettes, cadres de vélo...).

Ces matériaux techniques offrent :

- ✓ **Résistance à la rupture, à la compression, à la torsion** nécessaire pour les éléments de protection (casque de VTT avec fibre de lin par exemple)
- ✓ **Absorption des vibrations** (pour les raquettes de tennis, les sports de glisse)
- ✓ En combinaison avec d'autres fibres, permettent l'alliance de la résistance et de d'absorption des chocs pour un **meilleur confort d'utilisation**

Chapitre 3. Propriétés des fibres et leurs applications

Le groupe Oxyane (Décathlon) propose toute une **gamme de raquettes en lin composite** et souhaiterait étendre ce matériau aux **cannes à pêches, aux skis, aux vélos...** Le plus souvent, on retrouve ces produits dans des marchés de niche (notamment dans le sport de haut niveau) avec de forts besoins de performance et de confort.

Le cadre de vélo proposé par **Bamboo Bikes** est composé d'armatures entièrement faites de bambou avec des fixations qui intègrent des fibres de lin de Biotex (Figure III.5).



Fig.3.5 Vélo fabriqué à partir de Bambou [26]

3.4.4 Fibres textiles

Le bambou ne produit pas de fibres textiles naturelles comme le lin ou le chanvre. Il sert en revanche de matière première à grande échelle pour la fourniture de cellulose servant à la fabrication de la rayonne permettant de produire de la viscose, fibre textile synthétique très douce, d'une grande capacité d'absorption et imputrescible. La cellulose de bambou donne industriellement, par différents processus chimiques, une pâte visqueuse qui est finalement extrudée pour former en se refroidissant du fil. Les éventuelles propriétés antibactériennes sont obtenues en rajoutant un désinfectant, l'ammonium quaternaire. Rien de très écologique à tout cela. On peut tout aussi bien utiliser, comme le fait l'industrie papetière, d'autres sources de cellulose pour produire la viscose. La fibre naturelle de bambou, existe bien mais elle est rêche et cassante pour des usages textiles vestimentaires. Pour paraphraser Bernard Pinoteau, membre de l'AEB et puisque rien n'arrête les publicitaires, après les serviettes en bambou, pourquoi pas le slip de bain en pin des landes ou la cravate en eucalyptus du Portugal, 100% fibres naturelles ?

Chapitre 3. Propriétés des fibres et leurs applications

La plante la plus intéressante en Europe pour la production de fibres est le chanvre (*Cannabis sativa*) qui en contient beaucoup, se cultive facilement, est peu gourmande en intrants et qui a une bonne capacité à être traité industriellement. Anciennement utilisé pour les cordages, les voiles de bateaux et les vêtements, la fibre est solide et a un fort pouvoir absorbant. Les rendements actuels se situent en moyenne à 8 tonnes/hectare et toute la plante (chanvre) est valorisable.

La figure 3.6 illustre quelques applications des fibres naturelles d'origine animale dans le secteur des textiles.



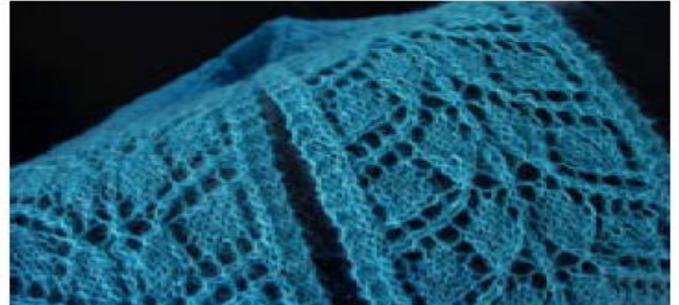
Alpaga



Angora



Cachemire



Mohaire

Fig.3.6 les applications des fibres naturelles d'origine animale

Chapitre 4

**Le marché, les avantages, les inconvénients et l'impact environnemental
des bio-composites**

4.1 Introduction

Lorsque la nouvelle réglementation environnementale impose une réduction des émissions de CO₂ dans l'ensemble des secteurs industriels et que les fabricants sont incités à adopter des concepts durables, les bio-composites bénéficient de ce contexte réglementaire et enregistrent une demande croissante.

Par exemple, les constructeurs automobiles sont soumis à des objectifs européens de recyclabilité (un taux de 95% doit être atteint en 2015, contre un peu plus de 85% aujourd'hui) et d'émission de gaz à effet de serre (un seuil de 130 g CO₂/km est fixé pour 2015). Pour répondre à ces contraintes, certains constructeurs ou équipementiers automobiles intègrent la recherche sur les biomatériaux comme élément clé de leur plan d'action. Ainsi, Faurecia, a lancé en 2008 le projet de recherche Nafi (Natural fiber for injection), qui lui a permis de mettre au point des pièces en lin composite avec un gain de masse de 25% [37].

4.2. Les avantages des fibres naturelles

L'usage des fibres végétales n'est pas simplement une opération de substitution; elles ont des spécificités qu'il est intéressant de valoriser, par exemple:

- ✓ Une origine renouvelable.
- ✓ Elles sont durables et biodégradables.
- ✓ Les performances mécaniques spécifiques de certaines fibres sont importantes.
- ✓ Elles demandent peu d'énergie pour être produites (en comparaison avec les fibres de verre).
- ✓ Propriétés mécaniques supérieures à celles des composites classiques.
- ✓ Leur incinération permet de récupérer de l'énergie...

Les industriels exploitent ces spécificités et utilisent les bio-composites avec différents arguments car ils permettent :

- ✓ Une réduction des impacts sur l'environnement.
- ✓ Des gains de masse dans certains cas.

Chapitre 4. le marché, les avantages, les inconvénients et l'impact environnemental des bio-composites

- ✓ Différents scénarios en fin de vie (recyclage si la matrice est de type thermoplastique, valorisation énergétique, bio-compostage sur la matrice si elle le permet et qu'aucun élément écotoxique n'a été introduit dans la formulation).
- ✓ La possibilité de donner une finition naturelle aux pièces.
- ✓ La réduction des impacts sur la santé humaine des opérateurs.
- ✓ De se préparer à la mise en place d'une législation avec des contraintes environnementales (Reach par ex.).
- ✓ De donner une valeur stratégique à des produits... [37]
- ✓ **Disponibilité de fibres végétales**

Un aspect particulièrement important concernant les fibres végétales est qu'elles sont disponibles dans presque tous les pays du monde, comme l'illustre la figure 4.1

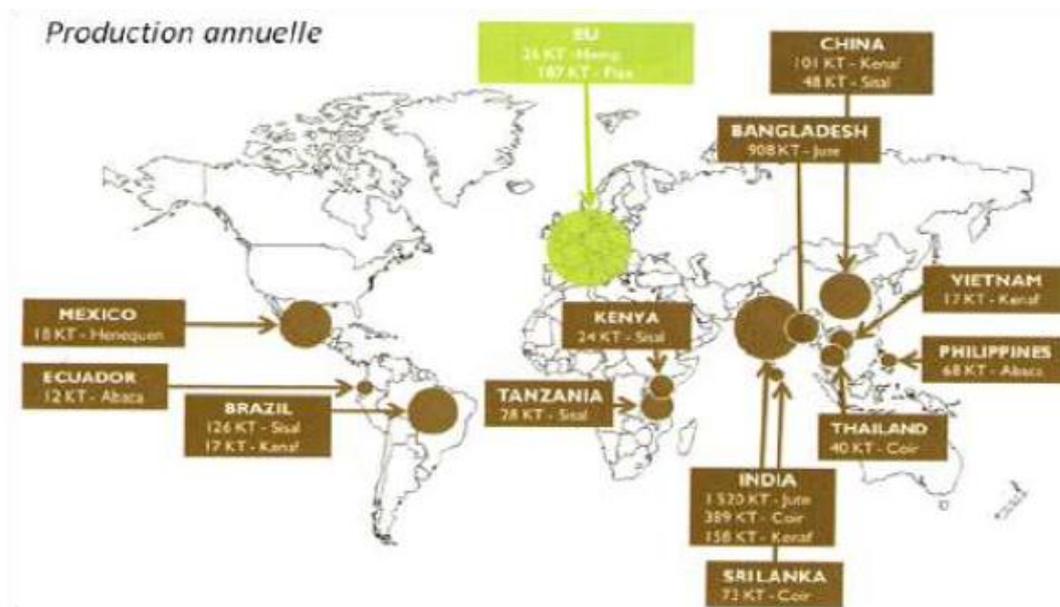


Fig.4.1 : Répartition mondiale annuelle de la production de fibres
(JEC Composites)

Elles varient évidemment d'un pays à l'autre en fonction du climat. On retrouve par exemple le sisal en Amérique du Sud, le jute en Inde, le kenaf en Chine, et le lin et le chanvre en Europe. Le France est le premier pays producteur de lin. Elle représente plus de 80% de la production européenne, suivie de loin par la Belgique et les Pays-Bas. La région normande, par son climat tempéré favorable au développement du lin, est le premier bassin producteur de cette plante.

4.3. Les inconvénients des fibres naturelles

4.3.1. Problèmes d'adhésion fibres/matrice

Des compatibilisants sont le plus souvent nécessaires tenant compte de la nature hydrophile des fibres et, la plupart du temps, hydrophobe du polymère.

4.3.2. Problèmes de densité apparente

Les fibres naturelles ont une densité apparente faible et donc s'écoulent difficilement dans la trémie d'alimentation des machines de mise en œuvre, ce qui nécessite une pré-granulation, quand c'est possible. .

4.3.3. Problèmes de viscosité

Les fibres naturelles augmentent la viscosité du polymère

4.3.4. Problèmes d'odeurs

Le processus de dégradation des fibres végétales dégage des odeurs qui dépendent de leur nature et de leur mode de préparation ainsi que de la température de mise en œuvre [9].

4.3.5. Problème de la température

Un autre problème est que la température de traitement des composites est limitée à 200°C car les fibres végétales risquent de subir des dégradations à des températures plus élevées, ce qui limite le choix de la matrice.

Une autre restriction à l'exploitation des fibres naturelles pour des applications composites est la faible résistance microbienne et la sensibilité à la pourriture. Ces propriétés posent de graves problèmes durant le transport, le stockage, le traitement et la mise en œuvre des composites.

L'hétérogénéité et les variations de dimensions et de propriétés mécaniques (même entre les plantes de la même culture) posent également un autre problème.

Chapitre 4. le marché, les avantages, les inconvénients et l'impact environnemental des bio-composites

Mais il est clair que les avantages l'emportent sur les inconvénients. Pour améliorer la stabilité thermique, la compatibilité entre le polymère et les fibres naturelles, et ainsi améliorer les propriétés des composites, réduire la perméabilité à l'eau ..., la surface des fibres peut être modifiée par des méthodes physiques ou chimiques [2].

4.3.6. Problème pour la santé

Le fibre d'amiante, une fois inhalée, se déposent au fond des poumons, puis sont susceptibles de migrer dans l'organisme. Ainsi piégées, elles peuvent provoquer une inflammation non cancéreuse, des maladies bénignes ou des cancers.

En effet, la poussière d'amiante engendre des anomalies des chromosomes, conduisant à une transformation cancéreuse des cellules.

4.4. Le marché

Les bio composites représentent 14% du marché des composites en 2010. Ce pourcentage plutôt élevé dans le domaine des biomatériaux – en comparaison, les bioplastiques représentent moins de 1% du marché global du plastique – est appelé à doubler à l'horizon 2020 afin d'atteindre 29%.

Il faut remarquer également l'inversion d'importance des procédés utilisés : l'extrusion et l'injection prendront rapidement les devants même si le moulage par compression continuera de connaître un développement notable. Enfin, une très forte progression (x20) concernant les composites renforcés avec des fibres naturelles est prévue.

Le marché mondial des bio composites (Figure IV.2) atteint 2,1 milliards de dollars en 2010 avec un taux de croissance de 15% ces cinq dernières années. En 2016, il est censé atteindre 3,8 milliard de dollars [49].

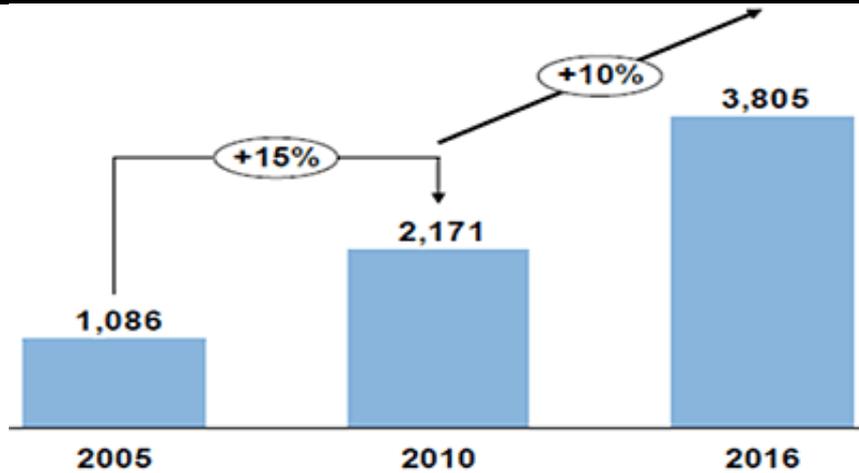


Fig.4.2. Expansion du marché mondial des bio composites [49]

La figure 4.3 illustre la répartition des fibres naturelles utilisées dans l'automobile

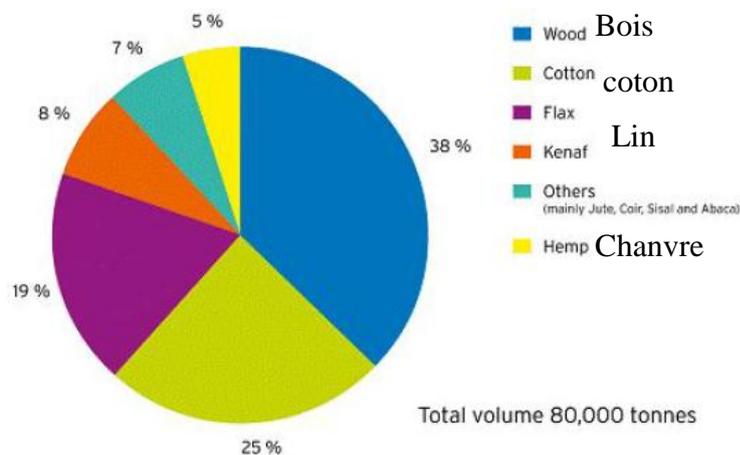


Fig.4.3 Usage de fibres naturelles dans l'automobile [49]

4.4.1. Bio-composites "vert-vert"

Le recyclage des bio-composites présente un intérêt dans la mesure où la quantité à recycler est importante. Actuellement, le marché des bio-composites "vert-vert" n'est guère étendu. Toutefois, l'épuisement des gisements pétroliers et les fluctuations du prix du baril de pétrole devraient favoriser le remplacement progressif de nombreux composites fabriqués à partir de matières premières pétrochimiques par des bio-composites.

Chapitre 4. le marché, les avantages, les inconvénients et l'impact environnemental des bio-composites

Les composites sont présents dans divers secteurs – automobile, aéronautique, ameublement – et ce marché est en croissance. De plus, de nombreuses recherches sont faites surtout dans le secteur automobile où la légèreté et la résistance des composites sont des propriétés très prisées. D'après l'European Industrial Hemp Association (EIHA), dans les dix prochaines années (2010-2020), la part des bio-composites sur le marché européen des composites va augmenter de manière significative [47].

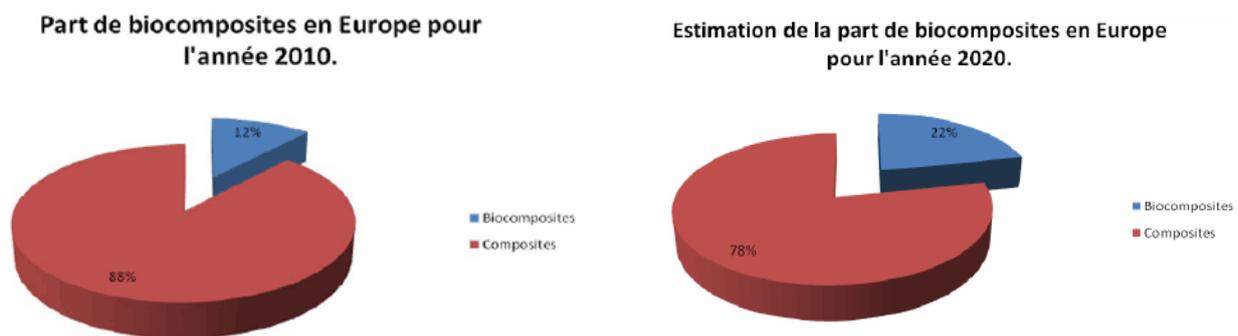


Fig.4.4 - Évolution envisageable de la part des bio-composites dans le marché européen des composites 2010-2020 [47]

IV.5. L'impact environnemental des bio composite

Le fait de charger un polymère comme le PVC avec 30% de fibres naturelles réduit d'autant sa teneur en matière fossile. L'impact écologique est donc important.

Si l'on compare un compound renforcé de fibres naturelles par rapport à un compound renforcé de fibres de verre, outre l'absence de toxicité, le faible coût, la faible densité, l'absence d'abrasion et une meilleure stabilité dimensionnelle, on constate de très grands avantages du point de vue du développement durable (Tableau 3.2 ,3.3 et 3.4).

4.5.1. Impact environnemental des bio-composites mesuré par l'analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV) d'un produit vise à répertorier l'ensemble de ses impacts environnementaux, de sa naissance à sa fin de vie. Envisageons les différentes fins de vie du bio-composite (recyclage, incinération, compostage,...) afin de déterminer la plus intéressante du point de vue environnemental.

4.6. De multiples techniques pour recycler les bio-composites

Le recyclage des bio-composites peut être mécanique, par remoulage ou encore chimique.

4.6.1. Recyclage mécanique

Par une série d'opérations unitaires – déchiquetage, broyage, tamisage –, il est possible de séparer les fibres présentes dans un bio-composite de la matrice. Les fibres ainsi récupérées ont certes subi une dégradation et restent encore partiellement recouvertes de la matrice, mais elles peuvent être réutilisées pour fabriquer d'autres produits. Par exemple, dans le cas de fibres cellulosiques, il est envisageable de les recycler dans le secteur papetier pour la fabrication de cartons ou d'agglomérés.

4.6.2. Recyclage par remoulage

Dans le cas d'une matrice thermoplastique (polymère fusible), il s'agit de remouler tout simplement le bio-composite à condition de ne pas détériorer le renfort c'est-à-dire les fibres. La condition la plus contraignante est la température de fonte : elle ne doit pas dépasser 200°C, température à laquelle la cellulose se dégrade.

4.6.3. Recyclage par voie chimique

Dans le cas d'une matrice thermodurcissable, il n'est pas possible de procéder à un remoulage du bio-composite. En effet, contrairement aux thermoplastiques, une fois transformés, les matériaux thermodurcissables sont infusibles : ils ne peuvent pas revenir dans leur formulation d'origine et être refondus. Par conséquent, ils sont difficiles à recycler et ne peuvent pas être réutilisés sous forme de matières premières.

Toutefois, de nouvelles techniques de récupération sont à l'étude. Citons par exemple la solvolysse évoquée dans le rapport de stage "Le recyclage des matériaux composites" de M. Boutin et A. Laisney. "Elle consiste à traiter le polymère par un solvant réactif capable de couper des liaisons présentes dans la structure macromoléculaire, conduisant à un mélange liquide de produits de dépolymérisation. Une séparation solide/liquide permet alors de récupérer les fractions inorganiques dans leur état d'origine et donc réutilisables. La fraction liquide peut être réutilisée pour la fabrication de nouveaux matériaux

Chapitre 4. le marché, les avantages, les inconvénients et l'impact environnemental des bio-composites

thermodurcissables. Une solvolysse performante permet donc un recyclage intégral du composite, associant une valorisation de tous les composants".

Cette méthode est encore délicate à mettre en œuvre [47].

4.7. Polymères et fibres utilisables

La cellulose qui est le principal constituant des fibres végétales se dégrade à partir de 250°C. Les seuls polymères utilisables comme matrice sont donc ceux dont la température de mise en œuvre reste inférieure à 250°C. Les polymères matriciels les plus courants sont les polyoléfinés, les styréniques et le PVC. Les principales fibres naturelles rentrant dans la composition des matériaux composites incluent la farine d'épicéa, la sciure d'épicéa, le chanvre, le sisal, le lin, le jute et le kénaf [48].

4.7.1. Modification des fibres naturelles comme solution

Les fibres de cellulose sont incompatibles avec les polymères hydrophobes. Or, la qualité de l'interface fibre-matrice est importante pour l'utilisation des fibres naturelles comme fibres de renfort pour les polymères. Il est donc très souvent nécessaire de modifier la surface des fibres pour optimiser cette interface. Les méthodes de modification sont différemment efficaces en ce qui concerne l'adhésion entre la matrice et les fibres.

Les fibres de renfort peuvent être modifiées par des méthodes physiques ou chimiques. Les méthodes physiques, telles que l'étirage, le calandrage, le traitement thermique, le laser, les rayons gamma, les UV, plasma... modifient les propriétés structurelles et de surface de la fibre et influencent ainsi les liaisons avec les polymères.

Les modifications chimiques comprennent des traitements avec de la soude, du silane (alcoxyde de silicium fonctionnalisé), de l'acide acétique, ou encore des molécules à base de benzoyl, d'isocyanate, de triazine ou d'imidazolidinone.

La méthode de couplage chimique est l'une des méthodes chimiques importantes qui permet l'amélioration de l'adhérence interfaciale. La composition chimique des agents de couplage leur permet de réagir avec la surface des fibres formant un pont de liaisons chimiques entre la fibre et la matrice. En général, les agents de couplage sont des molécules possédant deux fonctions, la première fonction réagit avec les groupes -OH de la cellulose et la seconde avec les groupes fonctionnels de la matrice [34].

Chapitre 4. le marché, les avantages, les inconvénients et l'impact environnemental des bio-composites

Lorsque deux matériaux sont incompatibles, il est également possible d'introduire un troisième matériau ayant des propriétés intermédiaires entre celles des deux autres afin d'améliorer cette compatibilité.

Les méthodes les plus fréquemment utilisées dans la littérature sont le traitement à la soude en premier lieu souvent suivi par une silanisation ou une acétylation ou encore l'addition d'un compatibilisant. Nous utiliserons donc ces méthodes pour traiter les fibres de bambou [2].

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

En résumé, les fibres naturelles sont moins dispendieuses et sont moins dommageables pour l'environnement que les fibres artificielles. D'un point de vue purement mécanique, les fibres artificielles sont intéressantes puisque leurs propriétés en flexion, en traction et en impact sont pratiquement toujours supérieures aux autres fibres. Cependant, dans certaines applications, comme par exemple en emballage, le but est d'avoir un matériau assez résistant mais pas nécessairement le meilleur; i.e d'avoir des propriétés mécaniques suffisantes tout en réduisant les coûts. C'est dans ce domaine que les fibres naturelles peuvent être beaucoup plus intéressantes que les fibres artificielles, puisqu'elles sont moins dispendieuses. Il y a également tous les aspects environnementaux dont il faut tenir compte. Les fibres naturelles ont habituellement un bilan net de CO₂ moins important que les fibres artificielles. Elles consomment moins d'énergie, sont biodégradables et endommagent habituellement moins les appareils de mise en forme que la fibre de verre ou de carbone. Un dernier point de comparaison est la densité des fibres naturelles habituellement plus faible que celle des fibres artificielles. Ce facteur pourrait être un élément clé dans le domaine du transport, où la réduction de poids signifie une réduction de coût énergétique, donc une économie d'argent.

Le développement des bio composites, qui sont donc des matériaux en devenir, demande une démarche d'innovation, ce qui impose des approches pluriculturelles, pluridisciplinaires, transdisciplinaires, multi-échelles et pluri-partenariales. Le terme transdisciplinaire signifie que les SHS (sciences humaines et sociales) ont un rôle majeur à jouer pour cette problématique à fort enjeu sociétal. L'aspect pluri-partenarial illustre le fait que de nombreux domaines de connaissance sont nécessaires provenant du monde académique mais aussi des mondes agricole et industriel. Il est important de rappeler l'importance des savoir-faire dans le domaine des matériaux composites. Les parois végétales présentent des spécificités dont il faut tenir compte.

Le secteur est confronté à de nouveaux challenges environnementaux :

- Les matériaux naturels peuvent contribuer à réduire l'impact environnemental global des bâtiments
- Il n'y a pas de mauvais matériaux, il n'y a que de mauvaises utilisations, mais pour bien utiliser, il faut bien connaître

Références

- [1] C Zamprogno et P Hourçourigaray (CCI Cherbourg Cotentin) Nautisme et Composites Bio Sources Décembre 2012
- [2] V V D Thi Matériaux composites fibres naturelles / polymère Biodégradables ou non Thèse doctorat, Université de Grenoble et Université des sciences de Hochiminh ville DES 20 juillet 2011,
- [3] A.RASKIN, « Les résines composites », support de cours Université Médicale Virtuelle Francophone, 2009.
- [4] B.LY, « Matériaux et Génie des procédés », Thèse de doctorat à, Institut National Polytechnique de Grenoble, (2008).
- [5] M. Abdelmouleh, S. Boufi, M.N. Belgacem, A. Dufresne, 2007; Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading; Composites Science and Technology 67, (1627-1639).
- [6] S Ramarad; Preparation and properties of kenaf bast fiber filled (plasticized) Poly (lactic acid) composites; Memoire de Master, (2008).
- [7] D T T Loan; Investigation on jute fibres and their composites based on polypropylene and epoxy matrices; Thèse de doctorat, Université de Dresden, (2006).
- [8] M. D. H Beg; the Improvement of Interfacial Bonding, Weathering and Recycling of Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites; Thèse de doctorat, University of Waikato, Hamilton, (2007).
- [9] www.pluscomposites.eu série de chroniques techniques s'adressant aux industriels souhaitant renforcer leurs connaissances dans le domaine des matériaux composites. Il a été rédigé dans le cadre du projet +Composites.

- [10] M. E .H BOURAHILI, Caractérisation d'un composite verre / époxy , Thèse de DOCTORAT Université Ferhat Abbas –Sétif 1 (2014)
- [11] F.S Chakar., A.J Ragauskas, Review of current and future softwood kraft lignin process chemistry, *Industrial Crops and Products*, 20, 131-141 (2004).
- [12] C Baley, Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. *Techniques de l'Ingénieur*. Ref.AM. 5 130, 15 pages (2004).
- [13] B RINGUETTE, Matériau composites à base de Fibre de Chanvre mémoire pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.) UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC (2011).
- [14] J-L Wertz , Les biocomposites et composites polymère-chanvre en particulier ValBiom valorisation de la biomasse . www.valbiom.be (2014).
- [15] Conférences techniques Avec le soutien de Les fibres composites d'origine naturelle. Hervé BINDI, CARMA Joël LÉVEQUE, ATOUTVEILLE Alain PARISSE, COMPOSITEC (28 septembre 2006).
- [16] C BELKACEMI Etude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort en matière végétale Mémoire de master, UNIVERSITE de BOUMERDAS (2006).
- [17] LI (Y.), MAI (Y.W.) ET YE - Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. *Composites Science and Technology*, vol. 60, issue 11, p. 2037-2055, (août 2000).
- [18] A. ISHIKAWA, S KUGA ET T OKANO - Determination of parameters in mechanical model for cellulose III fiber. *Polymer*, vol. 39, issue 10, p. 1875-1878, (1998).
- [19] P.J. JROE ET M.P ANSELL. - Jute-reinforced polyester composites. *J. Mater. Sci.*, vol. 20, issue 11, p. 4015-4020 (1985).
- [20] D NABI SAHEB et J. P JOG - Natural fiber polymer composites: a review. *Advances in Polymer Technology*, vol. 18, issue 4, p. 351-363 (1999).

[21] S. Mouhoubi, H. Osmani, T. Bali, S. Abdeslam Elaboration et Etude des propriétés des Composites Polyester / Alfa traitée et non traitée.

Laboratoire des Matériaux Non Métalliques, Institut d'Optique et Mécanique de Précision, Université Sétif 1, 19000 Algérie. *Verres, Céramiques & Composites, Vol.2, N°1 (2012), 34-40.*

[22] Site web www.algerie.elannabi.com/wilaya/batna.htm .

[23] Site web <http://www.automobile-entreprise.com> .

[24] <http://www.trex.com>

[25] <http://www.innobat.fr>

[26] <http://www.bamboobike.co>

[27] L.Y Mwaikambo, M. P Ansell, Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials. *J. Mater. Sci.*, (2006) 41, 2483-2496.

[28] S Kalia, B.S., Kaith, I. Kaur Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites - A review. *Polym. Eng. Sci.*, 49, 1253-1272 (2009).

[29] A Duval., A Bourmaud., L Augier., C Baley., Influence of the sampling area on the stem on the mechanical properties of hemp fibers, *Materials Letters*. 26 -11-10 (2010)

[30] R. Fedič, M. Žurovec, and F. Sehnal., Correlation between fibroin amino acid sequence and physical silk properties". *Journal of Biological Chemistry*, Vol. 278 (37), pp. 35255–35264, (2003)

[31] J. Pérez-Rigueiro, C. Viney, J. Llorca, and M. Elices., 2000, Mechanical properties of silkworm silk in liquid media". *Polymer*, Vol. 41, pp. 8433–8439.

[32] Damien Soulat, Etude de préformes en fibre de lin Rafael Masdeu de Pedro, Projet de fin de études (Ingénierie Industrielle) Maître de stage : Tuteur et coordinateur de projet : Enrique Barbero (Juin 2010)

[33] L Watson, Dallwitz MJ. 2008. Les genres d'herbe du monde: descriptions, illustrations, l'identification et la récupération des informations, y compris les synonymes, la morphologie, l'anatomie, la physiologie, la phytochimie, cytologie, la classification, les agents pathogènes, du monde et de distribution locale et des références.

[34] <http://fr.wikipedia.org/wiki/diss> _ (plante).

[35] A.K. Bledzki, J. Gasman, Composites reinforced with cellulose based fibres; Prog. Polym. Sci. (1999) 24, 221-274,

[36] Nicolas Dujardin. UN Matériau Biosource de Choix : les fibres naturelles. Caractérisation et applications. Daniel Thevenot. 25^{es} Journées Scientifiques de l'Environnement - L'économie verte en question, (Feb 2014), Créteil, France. JSE-2014 (01), 2014, Journées Scientifiques de l'Environnement. <hal-00978360>

[37] C, BALEY Biocomposites : des polymères renforcés par des fibres végétales. Etat de l'art et enjeux. Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne (Limab), E.A.4250, Université de Bretagne sud (2014)

[38] <http://www.elferdy.eu/catalog/fibres-naturelles/kenaf/>

[39] <http://davesgarden.com/guides/pf/showimage/25327/>

[40] <https://marineetsontextile.wordpress.com/2010/02/18/quand-le-textile-fait-marcher-Lhomme/>

[41] <http://chariotteetcariolette.uniterre.com/page2/&thisy=&thism=&thisd>

[42] <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-materiaux-fonctionnels-tian0/fibres-naturelles-de-renfort-pour-materiaux-composites-n2220/fibres-d-origine-animale-n2220niv10004.html>

[43] <http://www.princessefoulard.com/blog/tissu/soie/ver-soie-elevage-cocon/>

[44] <http://inspection.quebec/risques-pour-la-sante-associes-a-lamiante/>

[45] <http://www.caducee.net/DossierSpecialises/cancerologie/amiante1.asp>

[46] Le manuel des textiles (2009), Neugebauer&Zimmermann, pp.39-58

[47] <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2012/recyclage-biocomposite.htm>

[48] P. BOULOC, Le chanvre industriel, Ed. France Agricole, Paris, 2006

[49] <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2013/biocomposite-antichoc-nanocellulose.htm>