

SCIENCE ET INGÉNIERIE
DES MATÉRIAUX

Sous la direction de
Françoise Berzin

Composites polymères et fibres lignocellulosiques

Propriétés, transformation et caractérisation



Lavoisier
hermes

Sous la direction de
Françoise Berzin

Composites polymères et fibres lignocellulosiques

Propriétés, transformation et caractérisation

Lavoisier
hermes

Auteurs

Cet ouvrage a été coordonné par **Françoise BERZIN** : UMR FARE (Fractionnement des AgroRessources et Environnement), INRA, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims.

BALEY Christophe, FRE CNRS 3744, IRDL, Université de Bretagne-Sud, Lorient.

BEAUGRAND Johnny, INRA, UMR FARE, Université de Reims Champagne-Ardenne.

BEIGBEDER Joana, Centre des matériaux des mines d'Alès (C2MA), École des Mines d'Alès ; Technopole Hélioparc, Pau.

BERGERET Anne, Centre des matériaux des Mines d'Alès (C2MA), École des Mines d'Alès.

BOURMAUD Alain, FRE CNRS 3744, IRDL, Université de Bretagne-Sud, Lorient.

BUDTOVA Tatiana, MINES ParisTech, PSL Research University, CEMEF (Centre de mise en forme des matériaux), UMR CNRS 7635, Sophia Antipolis.

CASTELLANI Romain, MINES ParisTech, PSL Research University, CEMEF (Centre de mise en forme des matériaux), UMR CNRS 7635, Sophia Antipolis.

CHABBERT Brigitte, INRA, UMR FARE, Université de Reims Champagne-Ardenne.

DI GIUSEPPE Erika, MINES ParisTech, PSL Research University, CEMEF (Centre de mise en forme des matériaux), UMR CNRS 7635, Sophia Antipolis.

DUMONT Pierre J.J., LaMCoS, Université de Lyon, INSA Lyon.

KUREK Bernard, INRA, UMR FARE, Université de Reims Champagne-Ardenne.

LE DUIGOU Antoine, FRE CNRS 3744, IRDL, Université de Bretagne-Sud, Lorient.

LE MOIGNE Nicolas, Centre des matériaux des Mines d'Alès (C2MA), École des Mines d'Alès.

LE PLUART Loïc, Laboratoire de chimie moléculaire et thioorganique, ENSICAEN, UNICAEN, CNRS, Normandie Univ, Caen.

MARTOĬA Florian, LaMCoS, Université de Lyon, INSA Lyon.

ORGÉAS Laurent, 3SR Lab, Université de Grenoble-Alpes.

PAUL Clément, Laboratoire de chimie moléculaire et thioorganique, ENSICAEN, UNICAEN, CNRS, Normandie Univ, Caen.

VERGNES Bruno, MINES ParisTech, PSL Research University, CEMEF (Centre de mise en forme des matériaux), UMR CNRS 7635, Sophia Antipolis.

VINCENT Michel, MINES ParisTech, PSL Research University, CEMEF (Centre de mise en forme des matériaux), UMR CNRS 7635, Sophia Antipolis.

Table des matières

Auteurs	III
Préface	XIII

Chapitre 1

Production, transformation et critères de qualité des fibres de lin et de chanvre pour un usage dans les matériaux composites

1. Problématique de la production de fibres à usage pour les composites	1
<hr/>	
2. Fibres végétales : anatomie et structure	2
<hr/>	
2.1. Anatomie et origine botanique	2
2.2. Paroi végétale : principale composante des fibres	4
<hr/>	
3. Production de fibres de lin et de chanvre pour les applications composites	13
<hr/>	
3.1. Prétraitement des pailles de lin et chanvre	14
3.2. Principes de base de l'extraction de fibres à partir du lin et du chanvre	18

4. Propriétés et caractéristiques pertinentes des fibres en lien avec la deuxième transformation et les applications composites	23
4.1. Les différentes propriétés et caractéristiques clés des fibres à usage composite	24
4.2. Mécanismes de rupture dans le processus de fabrication d'un composite : défauts structuraux initiaux et induits	29
5. Conclusion	32

Chapitre 2

Traitements de préparation et de fonctionnalisation des fibres végétales : stratégies et conséquences sur les propriétés des fibres et composites

1. Traitements de préparation de surface des fibres végétales	41
1.1. Traitements de rouissage	41
1.2. Traitements thermiques	43
1.3. Traitements chimiques	45
2. Traitements de fonctionnalisation des fibres végétales	51
2.1. Traitements chimiques de fonctionnalisation de la surface des fibres	51
2.2. Modifications chimiques de la matrice	64
2.3. Traitements physiques de fonctionnalisation de la surface des fibres	67
3. Procédés de traitement des fibres végétales	70
3.1. Procédés de traitement par voie humide	71
3.2. Procédés de traitements par voie sèche	74
4. Conclusions et perspectives	76

Chapitre 3

Mécanismes de casse des fibres lignocellulosiques et propriétés rhéologiques des composites

1. Observations rhéo-optiques	90
1.1. Dispositif rhéo-optique pour l'observation des mécanismes de casse	91
1.2. Description des mécanismes de casse	93
1.3. Classification des fibres et corrélations avec la composition et la morphologie.....	100
2. Évolution de la morphologie des fibres en mélangeur interne	101
2.1. Matériaux et méthodes	102
2.2. Résultats sur le sisal	105
2.3. Comparaison des différents types de fibres	110
2.4. Conclusions	116
3. Propriétés rhéologiques des composites	116
3.1. Introduction.....	116
3.2. Influence de la concentration en fibres sur les propriétés viscoélastiques des composites.....	119
3.3. Dépendance viscosité-température	121
3.4. Analyse de l'influence du type de fibre et de la concentration sur les propriétés rhéologiques des composites.....	123
4. Conclusion	125

Chapitre 4

Préparation des composites à fibres lignocellulosiques en extrusion bivis

1. Difficultés inhérentes au procédé	132
--------------------------------------	-----

2. Approche expérimentale	133
2.1. Matériaux et méthodes	133
2.2. Influence des paramètres procédé sur la morphologie finale.....	136
2.3. Évolution des dimensions des fibres le long des vis	139
3. Approche théorique et modélisation	142
3.1. Calcul de l'écoulement le long des vis	142
3.2. Évolution de la morphologie des fibres le long des vis.....	144
3.3. Influence de la nature et de la morphologie initiale des fibres.....	146
3.4. Calcul de l'évolution morphologique le long des vis	148
4. Conclusion	154

Chapitre 5

Mise en œuvre des composites à fibres lignocellulosiques

1. Matrices polymères	160
1.1. Matrices thermoplastiques pétrosourcées	160
1.2. Matrices thermodurcissables pétrosourcées	161
1.3. Matrices biosourcées	161
1.4. Matrices élastomères biosourcées ou pétrosourcées.....	162
2. Renforts fibreux	162
2.1. Fibres lignocellulosiques millimétriques ou centimétriques	162
2.2. Fibres cellulosiques nanométriques et micrométriques	164
2.3. Architectures des renforts à fibres lignocellulosiques.....	165
2.4. Semi-produits	167

3. Procédés de mise en œuvre des composites à fibres lignocellulosiques	168
3.1. Aperçu général des procédés de mise en œuvre	168
3.2. Points critiques de la mise en forme de composites à renforts fibreux lignocellulosiques	175
3.3. Morphologie des fibres en injection de thermoplastiques renforcés de fibres courtes	180
3.4. Procédés LCM	186
3.5. Procédés de moulage par compression	196
4. Conclusion	201

Chapitre 6

Propriétés des composites à fibres lignocellulosiques « longues »

1. Introduction	213
1.1. Avant-propos	213
1.2. Un peu d'histoire	214
1.3. Classement des fibres végétales	214
1.4. Une tige de lin est une structure composite	215
1.5. Objectifs et description de ce chapitre	216
2. Propriétés des fibres végétales	216
2.1. Introduction	216
2.2. Propriétés géométriques et pourcentage d'eau absorbée	217
2.3. Comportement et propriétés mécaniques en traction de différentes fibres végétales	220
2.4. Reproductibilité des propriétés mécaniques des fibres de lin	225
2.5. Compléments sur les propriétés mécaniques des fibres	230

3. Propriétés mécaniques et comportement de matériaux composites renforcés par des fibres végétales	231
3.1. Introduction	231
3.2. Propriétés de plis unidirectionnels (UD) renforcés par des fibres de lin sollicités en traction longitudinale (L)	233
3.3. Compléments d'information sur le comportement des UD en traction longitudinale et les paramètres influents	237
3.4. Comportement en traction transverse d'un pli unidirectionnel	241
3.5. Comportement en compression longitudinale des UD	242
3.6. Tenue en fatigue	244
3.7. Tenue à l'impact	246
3.8. Amortissement	248
4. Conclusion	248

Chapitre 7

Analyse de cycle de vie des biocomposites et gestion de leur fin de vie

1. Analyse de cycle de vie (ACV)	266
1.1. Principe et fonctionnement d'un calcul environnemental	266
1.2. Limites de l'analyse de cycle de vie	269
1.3. Application de l'analyse de cycle de vie à la production des fibres de lin	270
1.4. Application de l'analyse de cycle de vie au développement d'un biocomposite polypropylène (PP)/lin pour l'automobile	273
1.5. Application de l'analyse de cycle de vie à la fin de vie d'un biocomposite polylactide (PLA)/lin	278
1.6. Conclusion	282
2. Recyclage des biocomposites	283
2.1. Méthodologie d'étude du recyclage des biocomposites	283

2.2. Performances mécaniques des biocomposites après recyclage.....	284
2.3. Caractéristiques des fibres végétales après recyclage.....	287
2.4. Conclusion	291
3. Biodégradation des biocomposites	292
<hr/>	
3.1. Définition de la biodégradation	292
3.2. Normes de biodégradabilité et labels	293
3.3. Méthodes de mesure de la biodégradabilité.....	294
3.4. Biodégradabilité des fibres naturelles et des biocomposites.....	297
3.5. Conclusion	301
4. Incinération des biocomposites	302
<hr/>	
5. Conclusion	304
<hr/>	
Index.....	311

Préface

La recherche sur les polymères composites à base de fibres lignocellulosiques connaît un essor considérable depuis quelques années. L'objectif principal est de remplacer les fibres de verre et de carbone abondamment utilisées par les industriels pour la fabrication d'articles de sport, de contenants, de matériaux de construction, de pièces d'automobiles, d'avion, etc. Notons que les fibres de lin sont de plus en plus utilisées par l'industrie, face au défi de développer des technologies durables et de fabriquer des matériaux écologiquement plus acceptables. Les fibres lignocellulosiques possèdent plusieurs avantages par rapport aux fibres synthétiques : faible masse spécifique, faible coût, abondance, biodégradabilité, absence de toxicité, taux de remplissage possiblement élevé, bonnes propriétés mécaniques et peu d'effets abrasifs sur les équipements lors de la mise en œuvre.

En revanche, les défis dans l'utilisation des fibres lignocellulosiques comme renfort des polymères sont nombreux. La plupart des polymères commercialement utilisés sont non polaires alors que les fibres de cellulose sont hydrophiles. Cette incompatibilité résulte en une faible mouillabilité des fibres par la matrice polymère, une mauvaise distribution et dispersion des fibres, la présence d'agglomérats et une faible adhésion fibre-matrice polymère. D'autres problèmes sont liés à la variabilité des propriétés en fonction de la source des fibres lignocellulosiques et à leur caractère hydrophile, entraînant une tendance à absorber de fortes quantités d'eau lors des applications, en particulier pour l'automobile. D'où la nécessité de faire des traitements de surface des fibres ou de les fonctionnaliser. Finalement, les éléments constitutifs se décomposent à des températures relativement faibles, ce qui limite la mise en œuvre des thermoplastiques chargés de fibres lignocellulosiques à environ 200 °C, d'où un choix restreint de thermoplastiques à faible point de fusion, tels le polyéthylène, le polypropylène, le polychlorure de vinyle et le polystyrène.

Ce livre inédit fait appel à l'expérience considérable qu'ont accumulée les auteurs à travers leur direction de nombreux travaux de thèse couvrant plusieurs aspects des composites polymères à base de fibres lignocellulosiques. Mentionnons le caractère exhaustif de cet ouvrage où les thèmes couvrent la biosynthèse, la fonctionnalisation des fibres, la mise en œuvre et les propriétés des composites et, finalement, l'analyse du cycle de vie de ces composites. L'ouvrage est composé de sept chapitres. Le

chapitre 1 porte sur la biosynthèse, structure et propriétés des fibres. Le chapitre 2 présente les traitements de préparation et de fonctionnalisation des fibres végétales : stratégies et conséquences sur les propriétés des fibres et composites. Les chapitres 3, 4 et 5 abordent les problèmes liés à la mise en œuvre de ces matériaux, avec les mécanismes de casse des fibres lignocellulosiques et les propriétés rhéologiques des composites, la préparation des composites à fibres lignocellulosiques en extrusion baxis et la mise en œuvre des composites à fibres lignocellulosiques. Les propriétés des composites à fibres lignocellulosiques « longues » sont présentées dans le chapitre 6. Finalement, dans le chapitre 7, les auteurs présentent l'analyse de cycle de vie des biocomposites et la gestion de leur fin de vie.

Pierre Carreau
Professeur émérite,
Polytechnique Montréal, Canada

Les polymères composites à base de fibres lignocellulosiques suscitent un intérêt considérable ces dernières années. L'objectif principal de ces matériaux est de remplacer les fibres de renfort classiques (verre, carbone) par des fibres d'origine naturelle (lin, chanvre, sisal, entre autres). En effet, ces fibres présentent de nombreux avantages : origine biosourcée, faible coût, faible densité et disponibilité. Cependant, la réalisation de composites à base de fibres lignocellulosiques pose encore de nombreux problèmes : variabilité des propriétés intrinsèques des fibres naturelles, compatibilité fibre hydrophile/matrice hydrophobe et dégradation thermomécanique des fibres au cours des procédés de mise en œuvre. Résoudre ces problèmes demande une approche pluridisciplinaire, allant de la biologie à la mécanique, en passant par la science des matériaux et les procédés de transformation.

C'est précisément l'objectif de cet ouvrage, qui est le fruit de la collaboration de nombreux universitaires, spécialistes reconnus de la question. Les principaux chapitres portent sur la production et les propriétés des fibres lignocellulosiques, les traitements de fonctionnalisation, les mécanismes de casse et les propriétés d'écoulement de ces composites, les procédés de transformation et de mise en œuvre (extrusion, injection...), les propriétés mécaniques et, finalement, l'analyse du cycle de vie et la gestion de leur fin de vie.

Cet ouvrage novateur et unique sur le sujet s'adresse aux techniciens et ingénieurs du domaine des composites, aux étudiants des 2^e et 3^e cycles en science des matériaux et, plus généralement, à tout lecteur curieux, intéressé par ce domaine en plein développement.

Ce livre a été coordonné par Françoise Berzin, Docteur MINES ParisTech et maître de conférences à l'Université de Reims Champagne-Ardenne.

