

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE L'IRRADIATION PAR LES RAYONS
ULTRAVIOLETS (UV) SUR LE COMPORTEMENT QUASI STATIQUE ET À
L'IMPACT À BASSE VITESSE DES COMPOSITES EN POLYÉTHYLÈNE
RENFORCÉS DE FIBRES COURTES DE KRAFT OU DE BOULEAU**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE
CONCENTRATION GÉNIE MÉCANIQUE**

**PAR
ABDELAZIZ BOUCETTA**

JUIN 2023

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
MAÎTRISE EN INGÉNIERIE
CONCENTRATION GÉNIE MÉCANIQUE (M. SC. A.)

Direction de recherche :

Lotfi Toubal, Ing., Ph.D., Professeur, UQTR	Directeur de recherche
---	------------------------

Jury d'évaluation

Lotfi Toubal, Ing., Ph.D., Professeur, UQTR	Directeur de recherche
---	------------------------

Prénom et nom

Demagna Koffi, Ing., Ph.D., Professeur, UQTR

Prénom et nom	Fonction du membre externe de jury
---------------	------------------------------------

Fouad Erchiqui, Ph.D., Professeur, UQTR

Prénom et nom	Fonction du membre externe de jury
---------------	------------------------------------

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je rends grâce à Dieu de m'avoir donné la force, la patience et le courage de parvenir à effectuer ce travail.

Un grand merci pour mon directeur Lotfi Toubal, qui a veillé sur le bon déroulement de ce mémoire d'une façon ou d'une autre, un grand merci pour sa compréhension et son soutien. J'ai beaucoup apprécié sa disponibilité, la qualité de nos échanges, la pertinence de ses points de vue et de ses conseils qui ont été d'une grande richesse pour moi et ont permis d'orienter l'étude au mieux et d'atteindre les objectifs fixés. Un grand merci pour son soutien financier.

Un grand merci au personnel du département de génie mécanique, en particulier Sébastien Lagacé pour leur gentillesse et serviabilité.

Un grand merci au personnel du laboratoire du CIPP, en particulier Isabelle Boulan et Daniel Béjin et Céline Leduc.

Un grand merci à Abdelhadi Hadj-Djilani, Abdelhadi Blal, El Mehdi Elmekhchi, Marielle Lavoisier et Philippe Blais, mes collègues aux laboratoires LMEM et ERICCA d'avoir été patients avec moi et de m'avoir accompagné avec leur présence à l'université et en dehors de l'université, j'ai passé d'agréables moments avec vous.

Un grand merci à mes amis Oussama El Ouss, Olivier et Nilofar, Yasser, Walid, Abdelali Shibebe d'Edmonton, Yassine RCA et Youness sami.

DÉDICACES

Je dédie ce travail à tous ceux qui m'ont apporté leur soutien tout au long de ces années d'études, à ceux qui ont été là pour me soutenir et m'aider à surmonter les moments difficiles.

Je souhaite dédier ce travail du fond de mon cœur à ma chère mère, Dalila, car il est le reflet de tout l'amour, le soutien et la force qu'elle m'a apportés tout au long de ces deux années intenses d'études. Même si la distance physique nous sépare, ton amour et ta présence ont toujours été près de moi, réchauffant mon cœur et m'insufflant la motivation nécessaire pour persévérer malgré les difficultés.

À mon cher père Messaoud, tu as été à mes côtés dans les pires et les meilleurs moments de ma vie.

À mon frère Hamza, je dédie ce travail avec une gratitude profonde et sincère. Tu as toujours été là pour me soutenir, me guider et croire en moi, même lorsque j'ai douté de moi-même.

À la mémoire de mon cousin Mohamed Si Abdallah.

À mes frères : Mostapha, Youcef, Toufik et Mohamed

À mes sœurs : Ratiba, Lyna, Khawla, Naciba et Rguya

À ma chère tante Louiza et mon oncle Hamia et Kchichi

À mes amis en Algérie : Hamza, Rahim, Khaled, Walid, Farouk, Islam, Badis, Nacer, Aress, Bachar et Abderrazak

RESUMÉ

Dans cette étude comparative, nous nous concentrons sur les composites à base de fibres naturelles, à savoir les composites à base de fibres de bouleau (contenant 12% de lignine) et les composites à base de fibres krafts (sans lignine). L'objectif est de voir comment ces composites réagissent à un vieillissement accéléré et à la lumière UV.

En raison des avantages environnementaux et des caractéristiques mécaniques intéressantes des composites à base de fibres naturelles, la recherche scientifique s'est concentrée sur ces derniers au cours des dernières décennies. La lignine, que l'on trouve dans les fibres de bouleau, est essentielle sur le plan structurel et possède des propriétés de protection contre les UV. Les fibres krafts, en revanche, ne contiennent pas de lignine.

De nombreux matériaux, en particulier les composites à base de fibres naturelles, présentent une détérioration due aux UV. La lignine joue le rôle d'inhibiteur de la dégradation par les UV, en absorbant les rayons nocifs et en protégeant les autres composants des fibres. Nous voulons savoir si la présence ou l'absence de lignine a un impact sur la résistance mécanique des composites lorsqu'ils sont exposés aux rayons UV.

Pour ce faire, nous soumettons des échantillons de ces composites à un vieillissement accéléré de 1440 heures. Pour caractériser les propriétés mécaniques des composites, des essais d'impact et de traction à basse vitesse sont également réalisés. Pour cela, nous soumettons les échantillons de ces composites à un vieillissement accéléré de 1440 heures. Nous effectuons des tests de traction et d'impact à basse vitesse pour caractériser les propriétés mécaniques des composites.

En résumé, cette étude vise à comparer les composites à base de fibres de bouleau et de fibres krafts en termes de résistance mécanique lorsqu'ils sont soumis à un vieillissement accéléré et à l'exposition aux rayons UV. En évaluant l'effet de la lignine sur la dégradation UV, nous espérons contribuer au développement de composites plus durables et résistants pour diverses applications.

Abstract

In this comparative study, we focus on natural fiber composites, namely birch fiber composites (containing 12% lignin) and kraft fiber composites (lignin-free). The aim is to see how these composites react to accelerated ageing and UV light. Due to the environmental benefits and interesting mechanical characteristics of natural-fiber-based composites, scientific research has focused on them in recent decades. Lignin, found in birch fibers, is structurally essential and has UV protection properties. Kraft fibers, on the other hand, contain no lignin. Many materials, especially natural-fiber composites, are subject to UV deterioration. Lignin acts as an inhibitor of UV degradation, absorbing harmful rays and protecting other fiber components. We want to know whether the presence or absence of lignin has an impact on the mechanical strength of composites when exposed to UV radiation. To this end, we are subjecting samples of these composites to 1440 hours of accelerated aging. To characterize the mechanical properties of the composites, low-speed impact and tensile tests are also carried out. For this, we subject samples of these composites to 1440 hours of accelerated aging. Low-speed impact and tensile tests are carried out to characterize the mechanical properties of the composites. In summary, this study aims to compare birch fiber and kraft fiber composites in terms of mechanical strength when subjected to accelerated aging and UV exposure. By assessing the effect of lignin on UV degradation, we hope to contribute to the development of more durable and resistant composites for various applications.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I	14
1.1 Introduction générale	14
1.2 Problématique	15
1.3 Questions de recherche	16
1.4 Objectifs	16
CHAPITRE II - REVUE DE LITTÉRATURE	17
2.1 Introduction	17
2.2 Matériaux composites à fibres naturelles	17
2.3 Les matrices thermoplastiques	18
2.3.1 Polyéthylène haute densité HDPE	19
2.4 Les fibres naturelles	20
2.4.1 Classification des fibres naturelles	21
2.4.2 Les propriétés mécaniques des fibres naturelles	22
2.5 Les fibres de bois	23
2.5.1 Structure de la fibre de bois	23
2.5.2 La cellulose	24
2.5.3 Hémicelluloses	25
2.5.4 La lignine	25
2.6 Procédés de fabrication des fibres de bois	27
2.6.1 Mise en pâte chimique	28
2.7 Les thermoplastiques et fibres de bois courtes	29
2.8 Vieillessement par rayonnement ultraviolet des composites à fibres naturelles	30
2.8.1 Le rayonnement ultraviolet	30
2.8.2 Phénomène de photo-dégradation des composites à fibres naturelles	30
2.8.3 Impact du vieillissement sur l'apparence visuelle	31
2.8.4 Effet de vieillissement par rayonnement UV sur les propriétés mécaniques des composites à fibres naturelles	32
2.9 Test d'impact	33
2.10 Test de traction	35
2.11 Conclusion	37

CHAPITRE III - MÉTHODOLOGIE	39
MATÉRIAUX ET TECHNIQUES D'ANALYSE	39
3.1 Introduction	40
3.2 Préparation des fibres de bouleaux	40
3.3 Préparation de la pâte kraft	40
3.3.1 Préparation des fibres de kraft	41
3.3.2 Désintégration	41
3.4 Caractérisations des fibres	42
3.4.1 Taille des fibres	42
3.4.2 Le taux de lignine	42
3.4.3 Résultats	43
3.5 Préparation de la pâte composite	44
3.5.1 Mise en granules	45
3.6 L'injection	45
3.7 Vieillissement artificiel	46
3.8 Test de couleur	47
3.9 Analyse par microscope électronique à balayage	48
3.10 Test de rugosité	49
3.11 Test de traction	50
3.12 Test impact à basse vitesse	51
3.13 Conclusion	52
CHAPITRE IV - RÉSULTATS ET DISCUSSION	53
4.1 Résultats de la taille des fibres	53
4.2 Test de couleurs	54
4.3 Résultats MEB (microscope électronique à balayage)	55
4.4 Test de rugosité	57
4.5 Résultats de traction avant vieillissement	58
4.6 Résultats d'impact avant vieillissement	61
4.7 Les résultats de traction après le vieillissement	65
4.8 Les résultats d'impact après vieillissement	69
Conclusion générale	74

Recommandations et perspectives	75
ANNEXES	82

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Les matériaux composites	18
Figure 2.2 Classification des fibres naturelles [17]	22
Figure 2.3 Microstructure du bois [21].....	24
Figure 2.4 La paroi cellulaire responsable des propriétés mécaniques des fibres lignocellulosiques [25].....	26
Figure 2.5 Schéma du procédé de la fabrication des fibres de bois.....	28
Figure 2.6 Classification des composites bois-polymères [29]	30
Figure 2.7 Dégradation par UV des matériaux composites à fibres naturelles [25].....	31
Figure 2.8 Évolution de la couleur de composites au cours d'un vieillissement accéléré [35].....	32
Figure 2.9 Variation des propriétés mécaniques (a)Valeurs du module d'élasticité en fonction de l'irradiation et du taux de fibres. (b) Influence du vieillissement par UV sur les résistances à l'impact.....	33
Figure 2.10 Protocole expérimental du test d'impact à basse vitesse [44].....	34
Figure 2.11 Courbes d'impact force-temps, déplacement-temps, force-déplacement et énergie-temps [45].....	35
Figure 2.12 Courbes de traction contrainte-déformation [46]	37
Figure 3.1 Diagramme de la méthodologie	39
Figure 3.2 Désintégrateur	41
Figure 3.3 Analyseur de la qualité de la fibre (L&W FIBER TESTER).....	42
Figure 3.4 Protocole de la méthode de Klason.....	43
Figure 3.5 Rouleaux Brabender.....	44
Figure 3.6 Le granulateur.....	45
Figure 3.7 Machine de 100 tonnes de ZE 900 de ZHAFIR Plastics Machinery	46
Figure 3.8 Schématisation d'un QUV (a) en mode condensation (b) en mode aspersion (pulvérisation)	47
Figure 3.9 Spectrophotomètre	48
Figure 3.10 Microscope électronique à balayage.....	49
Figure 3.11 Rugosimètre	50
Figure 3.12 Machine de traction.....	51
Figure 3.13 La machine d'impact.....	52
Figure 4.1 La taille des fibres a) fibre de bouleau, b) fibre de kraft.....	53
Figure 4.2 Évolution des changements de couleur et de luminosité en fonction du temps d'exposition des composites à base de fibre de bouleau	54
Figure 4.3 Évolution des changements de couleur et de luminosité en fonction du temps d'exposition des composites à base de fibre de kraft	55
Figure 4.4 Évolution de l'état de la surface des deux composites en fonction du temps d'exposition	56
Figure 4.5 L'évolution de la rugosité moyenne (Ra) du composite à base de fibre de bouleau	57
Figure 4.6 L'évolution de la rugosité moyenne (Ra) du composite à base de fibre de kraft	58
Figure 4.7 Courbe contrainte-déformation en fonction du taux de fibre de bouleau des éprouvettes saines.....	59
Figure 4.8 Courbe contrainte-déformation en fonction du taux de fibre de kraft des éprouvettes saines.....	60

Figure 4.9 Courbe force-déplacement en fonction du taux de fibre de bouleau des éprouvettes de sains?	62
Figure 4.10 Courbe force-déplacement en fonction du taux de fibre de kraft des éprouvettes sains.	62
Figure 4.11 Courbes contrainte-déformation des composites à base de fibre de bouleau en fonction du taux de fibre de bouleau (échantillons sains et vieillis jusqu'à 1440 h)	66
Figure 4.12 Courbes contrainte-déformation des composites à base de fibre de kraft en fonction du taux de fibre de bouleau (échantillons sains et vieillis jusqu'à 1440 h)	66
Figure 4.13 L'évolution des propriétés en traction des composites sains et jusqu'à 1440 heures du vieillissement.....	68
Figure 4.14 Courbes force-déplacement des composites à base de fibre de bouleau en fonction du taux de fibre de bouleau (échantillons sains et vieillis jusqu'à 1440 h)	70
Figure 4.15 Courbes force-déplacement des composites à base de fibre de kraft en fonction du taux de fibre de bouleau (échantillons sains et vieillis jusqu'à 1440 h).....	71
Figure 4.16 L'évolution propriétés d'impact des composites saines et jusqu' à 1440 heures du vieillissement.....	72
Figure A.1 L'évolution de l'endommagement sur la face arrière des échantillons impactés pour les éprouvettes qui contiennent 10 % des fibres à différents prélèvements (de 0 à 1440 heures) ...	82
Figure A.2 L'évolution de l'endommagement sur la face arrière des échantillons impactés pour les éprouvettes qui contiennent 20 % des fibres à différents prélèvements (de 0 à 1440 heures) ...	82
Figure A.3 L'évolution de l'endommagement sur la face arrière des échantillons impactés pour les éprouvettes qui contiennent 30 % des fibres à différents prélèvements (de 0 à 1440 heures)...	83
Figure B.1 L'évolution de la taille des fissures en fonction du temps de vieillissement pour les composites qui contiennent 20 % des fibres.....	84
Figure B.2 L'évolution de la taille des fissures en fonction du temps de vieillissement pour les composites qui contient 30 % des fibres.....	84
Figure C.1 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 10 % de fibre de bouleau avant vieillissement	85
Figure C.2 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 10 % de fibre de bouleau après 1440 heures de vieillissement.....	85
Figure C.3 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 10 % de fibre de kraft avant vieillissement	86
Figure C.4 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 10 % de fibre de kraft après 1440 heures de vieillissement	86
Figure C.6 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 20 % de fibre de bouleau après 1440 heures de vieillissement.....	87
Figure C.5 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 20 % de fibre de bouleau avant vieillissement	87
Figure C.7 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 20 % de fibre de kraft avant vieillissement	88
Figure C.8 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 20 % de fibre de kraft après 1440 heures de vieillissement	88
Figure C.9 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 30 % de fibre de bouleau avant vieillissement	89
Figure C.10 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 30 % de fibre de bouleau après 1440 heures de vieillissement.....	89

Figure C.11 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 30 % de fibre kraft avant vieillissement.....	90
Figure C.12 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 30 % de fibre de kraft après 1440 heures de vieillissement	90
Figure D.1 Évolution des fissures lors du test de traction pour des échantillons vieillis à 1440 heures avec 30 % de fibres A) kraft, B) bouleau	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Propriétés mécaniques de certains thermoplastiques [11]	19
Tableau 2.2 Comparaison entre les fibres naturelles et les fibres de verre [19]	23
Tableau 4.1 Propriétés mécaniques en traction des composites de bouleau et de kraft avant vieillessement	60
Tableau 4.2 Propriétés mécaniques à l'impact des composites de bouleau et de kraft avant vieillessement	63
Tableau 4.3 L'évolution propriétés en traction des composites avant et après 1440 heures du vieillissement	68
Tableau 4.4 L'évolution propriétés d'impact des composites saines et jusqu' à 1440 heures du vieillissement	72

CHAPITRE I

1.1 Introduction générale

Les composites à fibres de bois courtes sont fabriqués en mélangeant des fibres de bois avec une matrice polymère, tels que du polypropylène ou du polyéthylène. Les fibres de bois sont généralement obtenues à partir de résidus de l'industrie forestière ou de déchets de bois. L'ajout de fibres de bois dans la matrice polymère permet d'améliorer les propriétés mécaniques et thermiques des composites, tout en réduisant leur densité [1]. Ces propriétés intéressantes rendent les composites à fibres de bois courtes populaires dans de nombreux secteurs industriels. Par exemple, dans l'industrie de la construction, les composites à fibres de bois courtes sont utilisés pour la fabrication de panneaux isolants, de revêtements de sol et de portes et fenêtres. Dans l'industrie automobile, ils sont utilisés pour la fabrication de pièces intérieures et extérieures légères et résistantes [2]. Ces deux dernières décennies, l'industrie a progressé en introduisant des produits biosourcés et l'utilisation des fibres naturelles comme renforcement dans les matériaux composites n'a pas cessé de croître. Le marché des composites à fibres naturelles était estimé à plus de 4,46 milliards de dollars (USD) en 2016 et devrait atteindre 8,5 milliards d'ici 2025 en maintenant un taux de croissance annuel supérieur à 11 % [1]. Toutefois, la production des pièces en plastique reste dominée par l'industrie pétrochimique, donc de matière non renouvelable [5].

En ce qui concerne l'environnement, les composites à fibres de bois courtes sont considérés comme des matériaux durables et respectueux de l'environnement en raison de leur faible empreinte carbone et de leur recyclabilité. De plus, l'utilisation de déchets de bois, pour la production de ces composites, permet de réduire et de valoriser les déchets résiduels de l'industrie forestière [3]. Cependant, la durabilité des composites à fibres de bois courtes peut être affectée par des facteurs tels que l'exposition aux rayons ultraviolets (UV). Les rayons UV peuvent causer la dégradation de la matrice polymère et des fibres, ce qui peut réduire la résistance mécanique et la durabilité des composites à fibres de bois

courtes. La lignine est un polymère naturel présent dans les cellules végétales et est souvent utilisée comme additif pour renforcer les composites à fibres de bois.

Il devient important d'étudier l'influence de la lignine sur le comportement mécanique des composites à fibres de bois lorsqu'ils sont exposés aux rayons UV. Il est possible que la présence de la lignine dans la fibre puisse atténuer l'effet de l'exposition aux rayons UV des biocomposites sur leurs performances mécaniques [4].

Ce projet de maîtrise en ingénierie à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) se concentre sur l'étude de l'influence de la lignine sur le comportement en traction et à l'impact des matériaux composites à base de fibres de bois lorsqu'ils sont exposés à l'effet combiné du rayonnement ultraviolet des de l'humidité relative.

1.2 Problématique

Depuis de nombreuses années, le besoin en produits biosourcés a connu une forte explosion. En réponse, de nombreux laboratoires et industries se sont attelés à développer de nouveaux biomatériaux et composites verts et durables. Cependant, bien qu'en plein essor, il existe encore de nombreuses questions sans réponses et contraintes à résoudre avant de pouvoir envisager un remplacement total des produits pétrosourcés.

Les matériaux composites sont sensibles aux dommages d'impact et les pertes de propriétés mécaniques qui leur sont associées affaiblissent le matériau. La résistance aux chocs à basse vitesse des composites à fibres naturelles courtes a fait l'objet de plusieurs études. Une bonne partie de ces travaux essaient d'étudier l'influence de la teneur en fibres, du procédé de fabrication et des agents de couplage sur les propriétés mécaniques des composites. Cependant, pour les essais d'impact, la plupart de ces études ne s'intéressent qu'aux essais d'impact uniaxiaux de types Izod qui ne simule ou ne reflète pas un vrai bris d'impact d'une pièce en service. Par contre, les essais biaxiaux de type puits de chute (drop-weight impact test) simulent les conditions réelles d'utilisation, et permettent de montrer davantage les caractéristiques mécaniques du matériau.

De plus, aucune étude n'a pris en compte l'influence de la teneur des constituants des fibres à savoir (la cellulose et la lignine, etc.) sur la résistance à l'impact des biocomposites.

La seconde problématique concerne la mesure des propriétés mécaniques résiduelles (impact et traction) après vieillissement UV. Il est donc crucial de développer le champ des connaissances sur ces sujets afin de pouvoir développer des composites biosourcés utilisables à l'échelle industrielle.

1.3 Questions de recherche

- Quelle est l'influence du taux des fibres et de présence de la lignine sur les propriétés mécaniques en traction et à l'impact de deux biocomposites à base de fibre de bouleau et kraft (10 % et 0 % en lignine, respectivement).
- Quelle est l'influence des UV sur les propriétés résiduelles en traction et à l'impact.

1.4 Objectifs

Mon projet vise :

- Évaluer l'influence du pourcentage des fibres sur la résistance à l'impact à basse vitesse et en traction des composites thermoplastiques.
- Étudier l'effet des ultraviolets sur le comportement mécanique des composites à fibres naturelles courtes avec et sans lignine.

CHAPITRE II - REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Les composites polymères renforcés avec des fibres de bois courtes sont des matériaux composites à base de polymères thermoplastiques ou thermodurcissables renforcés avec des fibres de bois. Ces composites présentent de nombreux avantages tels que leur faible poids, leur durabilité, leur résistance à la corrosion et leur aspect naturel. Cependant, ces composites sont soumis à la dégradation des rayons UV, qui peut entraîner une perte de propriétés mécaniques et une détérioration de l'apparence [6].

Le vieillissement UV est un phénomène complexe qui peut entraîner une dégradation chimique et une altération des propriétés physiques des matériaux. De nombreuses études ont été menées pour évaluer l'effet de l'exposition aux rayons UV sur les composites polymères à fibres de bois courtes. Ces études ont examiné les changements physiques, chimiques et mécaniques qui se produisent lorsqu'un tel composite est exposé à la lumière UV, et ont cherché à identifier les mécanismes sous-jacents responsables de ces changements. Cette revue de littérature examinera les études les plus récentes sur l'effet du vieillissement UV sur les composites et notamment les polymères renforcés par des fibres de bois courtes. Elle passera en revue les résultats des études les plus significatives et mettra en évidence les défis et les opportunités pour améliorer la résistance des composites polymères à la dégradation des rayons UV.

2.2 Matériaux composites à fibres naturelles

Un matériau composite est formé en combinant au moins deux matériaux qui ne sont pas miscibles, mais qui peuvent être assemblés. Les propriétés du nouveau matériau résultant sont différentes de celles des éléments constitutifs pris individuellement [7]. Le renfort est le matériau ajouté, souvent sous forme de fibres, tandis que la matrice est le matériau présent en plus grande quantité, qui assure la cohésion de la structure. Des additifs tels que l'oxyde de titane peuvent être ajoutés pour donner une coloration blanche aux composites, tandis que la poudre de quartz peut augmenter leur résistance à l'abrasion.

Les charges sont des composés chimiques ajoutés aux composites pour renforcer la liaison fibre/matrice.

La figure 1 présente un schéma illustrant les différents éléments constitutifs d'un matériau composite : la matrice, les renforts et les charges. [8].

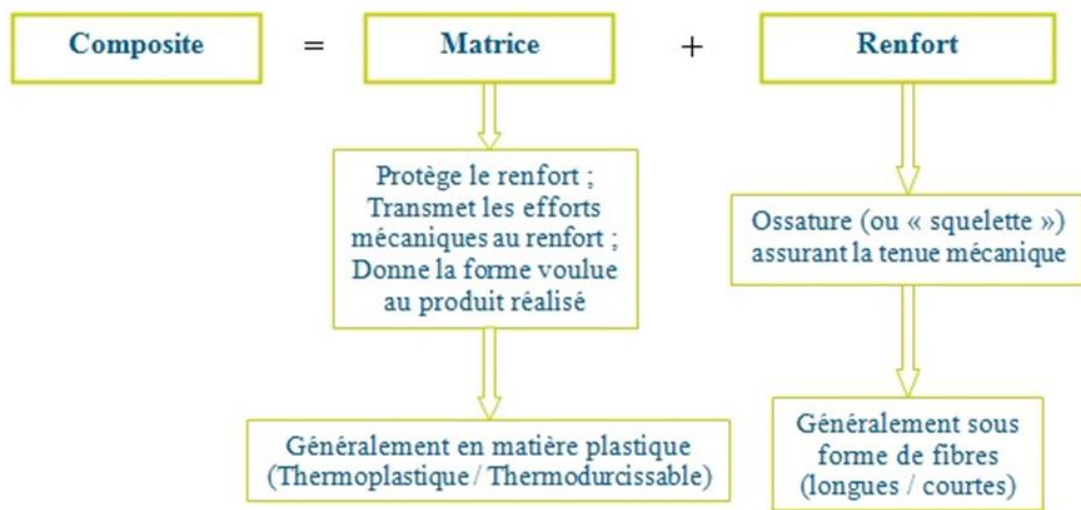


Figure 2.1 Les matériaux composites

2.3 Les matrices thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des matériaux qui deviennent souples et malléables sous l'effet de la chaleur, et peuvent être façonnés dans diverses formes avant de se durcir en refroidissant. Cette transformation est réversible et peut être renouvelée de nombreuses fois, ce qui les rend facilement recyclables. Cependant, les thermoplastiques ne sont pas biodégradables et peuvent durer plusieurs centaines d'années. Les polymères thermoplastiques sont composés de longues chaînes de carbone linéaires, avec éventuellement des chaînes latérales, et sont en principe solubles et fusibles. Lorsqu'ils sont chauffés à une certaine température, les chaînes de polymères deviennent très mobiles, ce qui permet à la matière d'être à l'état fondu. À mesure que la température

diminue, les chaînes se figent et des zones cristallines régulières appelées cristallites peuvent se former.

Cependant, cette cristallisation n'est jamais complète, ce qui rend les polymères semi-cristallins. Les cristallites sont souvent dispersées dans une matrice amorphe [9][10].

Tableau 2.1 Propriétés mécaniques de certains thermoplastiques [11]

Propriété	PP	LDPE	HDPE	Nylon 6
Densité	0,899-0,920	0,910-0,925	0,94-0,96	1,12-1,14
Absorption d'eau (24h)	0,01-0,02	≤0,015	0,01-0, 2	1,3-1,8
Tr(°C)	160-176	105-116	120-140	215
Rm (Mpa)	26-41,4	40-78	14,5-38	43-79
E (Gpa)	0,95-1,77	0,055-0,38	0,4-1,5	2,9
Elongation (%)	15-700	90-800	2-130	20-150
Résistance à l'impact (J/m)	21,4-267	≥854	26,7-1068	42,7-160

2.3.1 Polyéthylène haute densité HDPE

Le polyéthylène est un matériau thermoplastique qui est fabriqué en polymérisant l'éthylène (C₂H₄) pour former des macromolécules qui sont composées de la répétition d'un motif (CH₂-CH₂). Le polyéthylène à haute densité (HDPE) est un polymère linéaire qui ne possède pas de ramification courte et a une faible proportion de branches longues. Ce polymère a une densité comprise entre 0,94 et 0,96 g/cm³ et est fabriqué à basse pression. En revanche, le polyéthylène à basse densité (LDPE) est fabriqué par

polymérisation sous haute pression, ce qui entraîne des ramifications de tailles très différentes.

Le HDPE est un polymère thermoplastique couramment utilisé dans la production de bouteilles en plastique, de tuyaux résistants à la corrosion, de géomembranes et de bois d'œuvre en plastique.

Il est connu pour sa solidité et sa durabilité, ainsi que pour sa résistance aux produits chimiques et aux UV. Le HDPE est classé comme un polymère amorphe, car il n'a pas de structure cristalline spécifique. Cela lui donne la capacité d'être moulé et façonné à une large gamme de températures, ce qui en fait un choix populaire pour les processus de moulage par injection et d'extrusion. Le HDPE est également résistant à l'humidité, ce qui en fait un choix populaire pour les applications extérieures. Le HDPE peut être recyclé et est considéré comme un matériau sûr et respectueux de l'environnement [12][13].

2.4 Les fibres naturelles

Les renforts sont des matériaux ajoutés aux matrices thermoplastiques pour améliorer leurs propriétés mécaniques. Dans cette section, nous allons nous concentrer sur les fibres naturelles comme renforts. Nous discuterons des différentes fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour les composites thermoplastiques, notamment les avantages et les inconvénients des fibres naturelles par rapport aux fibres synthétiques.

Les fibres naturelles peuvent provenir de différentes sources, telles que les plantes, les arbres et les animaux. Chacune de ces fibres a des caractéristiques uniques qui peuvent influencer leur performance dans les composites thermoplastiques [14].

Les fibres naturelles présentent également des avantages significatifs par rapport aux fibres synthétiques. Tout d'abord, elles ont une empreinte environnementale réduite, car elles sont biodégradables et leur production nécessite moins d'énergie fossile que les fibres synthétiques. De plus, les fibres naturelles peuvent présenter une meilleure adhérence avec la matrice, ce qui peut améliorer les propriétés mécaniques du composite.

Cependant, les fibres naturelles ont également des inconvénients par rapport aux fibres synthétiques. Elles peuvent avoir une variation de qualité, ce qui peut affecter leur performance dans le composite.

En outre, leur résistance à la traction peut être inférieure à celle des fibres synthétiques, ce qui peut limiter leur utilisation dans des applications de haute performance.

En somme, les fibres naturelles présentent des avantages et des inconvénients spécifiques qui doivent être pris en compte lors de leur utilisation comme renforts pour les composites thermoplastiques. Il est important d'évaluer soigneusement les exigences de l'application et de choisir le type de fibre qui convient le mieux pour obtenir des performances optimales du composite [15].

2.4.1 Classification des fibres naturelles

Il y a une grande variété de fibres disponibles pour la fabrication de matériaux composites, qui sont généralement classées en fibres naturelles ou synthétiques. Les fibres naturelles sont subdivisées en fonction de leur origine, qu'elle soit végétale, animale ou minérale. Toutes les fibres végétales sont principalement constituées de cellulose, tandis que les fibres animales sont principalement constituées de protéines (par exemple les cheveux, la soie et la laine). Les fibres végétales comprennent des fibres provenant de tiges (comme le lin et le chanvre), de feuilles ou de matériaux durs (comme le sisal), de graines, de fruits, de bois, de paille, de céréales et d'autres fibres végétales.

La Figure 2.2 présente un diagramme classifiant les différentes fibres. Les fibres de bois peuvent être issues des résineux (pin, épinette noire, cèdre, etc.) ou des feuillus (chêne, peuplier, bouleau, etc.). Ces deux sources de bois permettraient d'obtenir des fibres avec des caractéristiques différentes entraînant des conséquences sur les propriétés du produit final (papier, composite, etc.) [16].

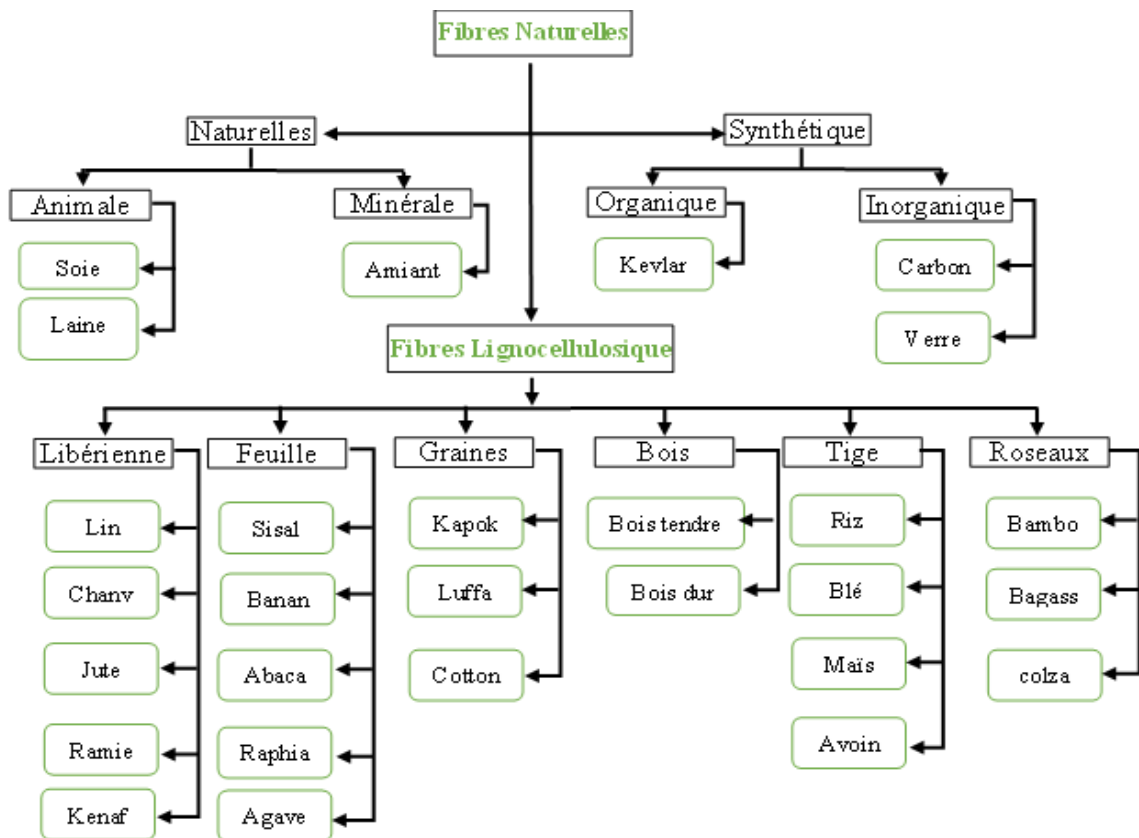


Figure 2.2 Classification des fibres naturelles [17]

2.4.2 Les propriétés mécaniques des fibres naturelles

Leur résistance à la traction et leur module d'élasticité sont généralement inférieurs à celles des fibres synthétiques tels que le verre Tableau 2.2. Cependant, les fibres naturelles ont des propriétés spécifiques, notamment leur rigidité, qui sont comparables à celles du verre. Les fibres naturelles présentent également l'avantage d'être environ 50 % plus légères que le verre, ce qui en fait un matériau intéressant pour les applications nécessitant une faible densité. En outre, les fibres naturelles sont souvent moins coûteuses que les fibres synthétiques, ce qui en fait une alternative intéressante pour les applications où le coût est un facteur clé [18].

Tableau 2.2 Comparaison entre les fibres naturelles et les fibres de verre [19]

Propriétés	Fibre							
	de verre	Chanvre	Jute	Ramie	Coir	Sisal	Lin	Coton
Masse volumique g/cm ³	2.55	1.48	1.46	1.5	1.25	1.33	1.4	1.51
Module de traction (MPa)	2400	550–900	400–800	500	220	600–700	800–1500	400
Module d'élasticité (GPa)	73	70	10–30	44	6	38	60–80	12
Allongement à la rupture (%)	3	1.6	1.8	2	15–25	2–3	1.2–1.6	3–10
Absorption d'humidité (%)	–	8	12	12–17	10	11	7	8–25

2.5 Les fibres de bois

Le bois est classé comme une matière lignocellulosique. Il est composé de constituants majeurs (cellulose, hémicellulose et lignine) et de constituants mineurs (cendres et matières extractibles). Les constituants majeurs sont des composants structurels de poids moléculaire élevé. Le bois est composé d'environ 60 – 75 % de cellulose, 10 – 20 % de lignine, 1 – 10 % de matières extractibles et 0 - 0,5 % de cendres. La composition chimique du bois varie selon les espèces [20].

2.5.1 Structure de la fibre de bois

La fibre de bois est constituée de deux parties : la paroi primaire et la paroi secondaire (S1 à S3), figure 2.3.

Le lumen, qui est une zone vide, permet le passage de la sève. Quant à la lamelle mitoyenne, elle sert à maintenir les fibres entre elles dans le bois. Celle-ci est principalement composée de lignine, contrairement à la fibre qui contient une faible proportion de lignine. Les composants majoritaires de la fibre sont la cellulose et les hémicelluloses [21].

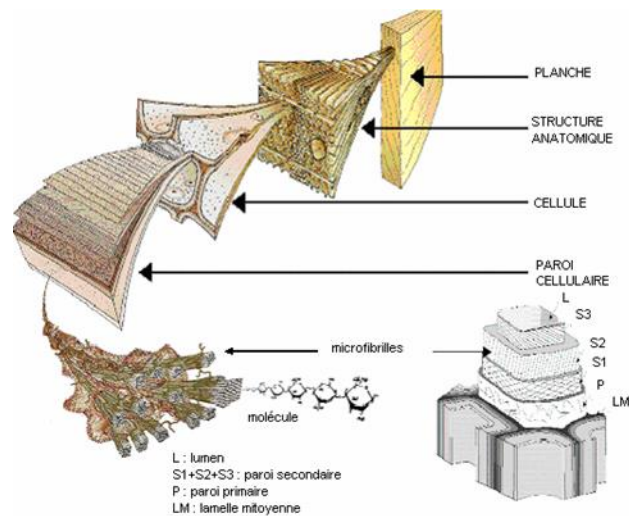


Figure 2. 3 Microstructure du bois [21]

2.5.2 La cellulose

La cellulose est une molécule linéaire composée de polysaccharides liés par des liaisons β -(1-4) glycosidiques. Les chaînes moléculaires sont disposées en rubans et peuvent former différents arrangements qui sont classés en cellulose I (avec des chaînes parallèles) et II (avec des chaînes antiparallèles). La cellulose I est présente naturellement sous deux formes cristallines distinctes, $I\alpha$ et $I\beta$, avec des symétries triclinique et monoclinique, respectivement.

Les microfibrilles de cellulose sont des structures thermodynamiques stables, avec un diamètre moyen allant de 1,2 à 4,8 nm et des longueurs allant de 60 à 150 nm. La

distribution des microfibrilles varie en quantité et en arrangement selon leur emplacement dans la paroi cellulaire.

Bien que la quantité de cellulose soit à peu près la même chez les résineux et les feuillus, dépassant approximativement 40 – 45 % en poids de la matière sèche dans la plupart des espèces de bois, la teneur en hémicelluloses diffère entre les deux types d'arbres [22] [23].

2.5.3 Hémicelluloses

Les hémicelluloses sont des polymères complexes de sucre présents dans la paroi cellulaire des plantes. Contrairement à la cellulose, les hémicelluloses sont composées d'une variété de monomères de sucre différents, tels que le xylose, l'arabinose, le mannose, le galactose et le glucose, qui peuvent être combinés dans différentes proportions.

Les propriétés des hémicelluloses varient en fonction de leur composition et de leur structure, ce qui les rend utiles dans une variété d'applications industrielles. Par exemple, certaines hémicelluloses peuvent être utilisées comme agents épaississants dans les aliments ou comme liants dans les adhésifs. D'autres hémicelluloses peuvent être transformées en xylitol, un édulcorant naturel utilisé dans les produits alimentaires.

Les hémicelluloses jouent également un rôle important dans la structure de la paroi cellulaire des plantes, où elles aident à lier la cellulose et la lignine. Lorsque les hémicelluloses sont éliminées de la paroi cellulaire, la structure globale de la paroi cellulaire est affaiblie, ce qui peut avoir des conséquences importantes pour la croissance et le développement des plantes [24].

2.5.4 La lignine

Les lignines sont des polymères amorphes formés par des unités phényle-propane. Elles sont constituées principalement par des unités aromatiques telles que le guai acyle, le syringyl et le phénylpropane. La lignine du bois agit comme un polymère de cimentation et de fixation dans la paroi cellulaire.

Elle est toujours présente en étroite association avec les polysaccharides. La nature composite du bois avec son mélange de cellulose, d'hémicellulose et de lignine rend les fibres rigides.

Par ailleurs, la lignine est un élément clé constitutif de la lamelle moyenne dans le bois, qui fonctionne comme une colle efficace et résistante, unissant les différentes cellules. La lignine inhibe le gonflement des parois cellulaires dans l'eau. Sa fonction fondamentale est de rendre imperméable la paroi cellulaire. Le maintien de l'hydrophobicité est requis pour le développement de cellules et le transport de l'eau et des éléments nutritifs. Par ailleurs, la lignine joue le rôle d'un agent antibactérien empêchant la dégradation microbienne du bois. Elle agit comme une barrière aux microorganismes, ce qui, avec la complexité et l'hétérogénéité de la lignine, rend le bois plus résistant contre les attaques microbiennes [24]. La figure 2.4 montre les polymères de la paroi cellulaire responsables des propriétés mécaniques des fibres lignocellulosiques.

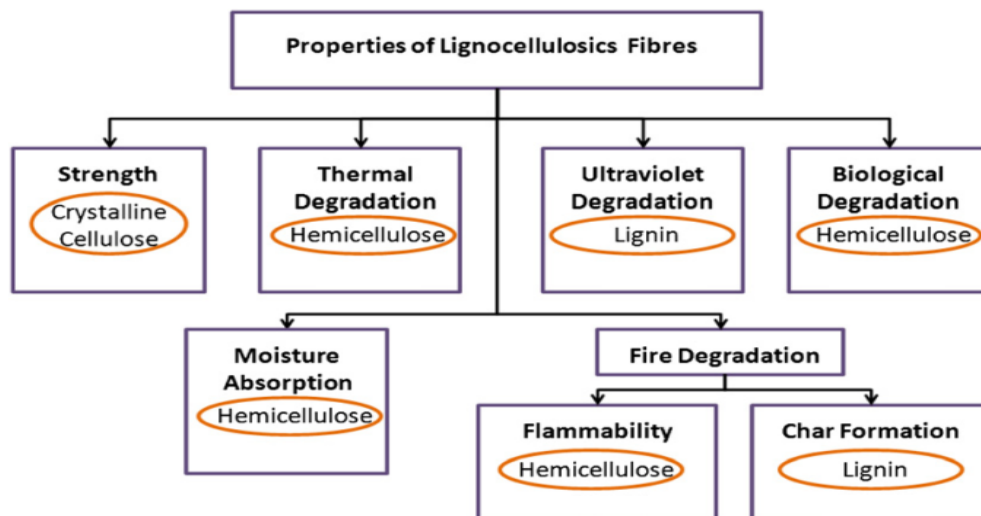


Figure 2.4 La paroi cellulaire responsable des propriétés mécaniques des fibres lignocellulosiques [25]

2.6 Procédés de fabrication des fibres de bois

Le bois est un matériau complexe composé de fibres de cellulose retenues ensemble par la lignine. Pour transformer le bois en pâte, il est nécessaire de séparer les fibres et, selon le procédé utilisé, retirer ou non la lignine, figure 2.5.

Les fibres utilisées dans cette étude sont issues du bois destiné à la fabrication de la pâte à papier. Le procédé de fabrication de ces fibres est basé sur le procédé thermomécanique. La pâte mécanique est obtenue en déchiquetant des billes de bois écorcées sur des meules abrasives ou des copeaux de bois entre deux plaques rainurées en acier tournantes ou dont l'une est stationnaire. Il en résulte des pâtes mécaniques de différents types tels que la « pâte mécanique sur meule » (PMM) et la « pâte mécanique de raffineur » (PMR). Ces types de pâtes sont généralement utilisés dans la fabrication de produits qui nécessitent moins de résistance, comme le papier journal.

Pour pallier les inconvénients de la pâte mécanique, tels que la résistance réduite des fibres et la présence de lignine, les copeaux de bois sont traités à la vapeur avant et pendant le raffinage. Le raffinage est réalisé sous pression et permet d'obtenir de la pâte thermomécanique (PTM). Ce procédé permet d'améliorer la qualité de la pâte et de réduire la quantité de pâte chimique ajoutée dans la production du papier journal. Pour améliorer encore davantage la qualité de la pâte produite, des produits chimiques sont ajoutés aux copeaux de bois lors de la fabrication. Cette variante du procédé mécanique, appelée « pâte chimico-thermomécanique » (PCTM), permet de réduire davantage la quantité de pâte chimique ajoutée dans la production de papier de qualité supérieure.

Le procédé de mise en pâte thermomécanique (TMP) utilise des copeaux de bois soumis à une température supérieure à 100 °C dans de la vapeur pour ramollir les fibres. Les fibres sont ensuite défibrées sous pression dans un raffineur muni de deux disques rotatifs tournant à grande vitesse. Le processus de compression et de décompression répété permet d'obtenir une pâte à un taux de rendement d'environ 90 %. Dans certains cas, deux raffineurs sont utilisés en série pour obtenir des fibres plus courtes [26].

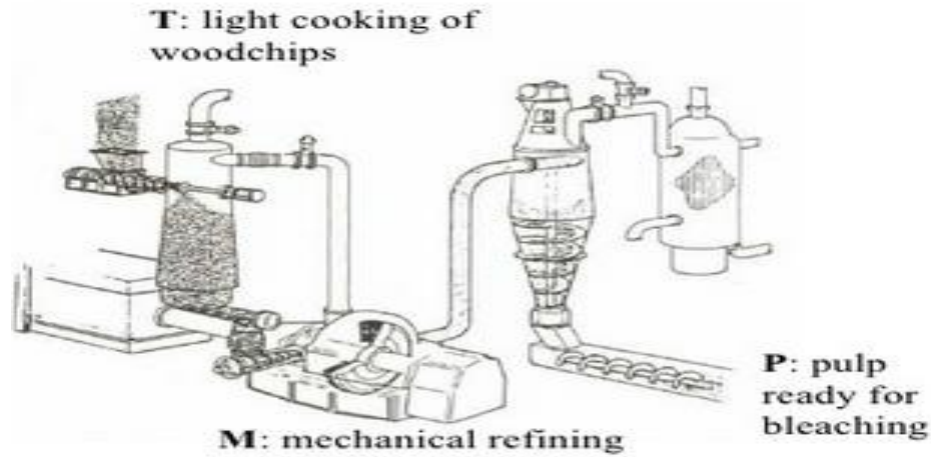


Figure 2.5 Schéma du procédé de la fabrication des fibres de bois

2.6.1 Mise en pâte chimique

Le procédé de mise en pâte chimique implique l'utilisation de solutions de produits chimiques pour dissoudre la lignine du bois, ce qui libère les fibres et les sépare les unes des autres. Les techniques varient en fonction du pH de la solution utilisée, avec le procédé kraft à pH alcalin étant le plus courant et le procédé au sulfite en milieu neutre étant le deuxième plus courant. Pendant ces traitements, seuls les cristaux de cellulose ne sont pas affectés, tandis que les hémicelluloses et la lignine sont dégradées, ce qui présente des avantages et des inconvénients. La dégradation de ces composés à l'avantage de produire de la pâte qui est principalement constituée de cellulose, mais le rendement est faible en raison de la dissolution de ces composés. De plus, le procédé nécessite l'utilisation de produits soufrés et une température élevée, ce qui rend le processus coûteux. La liqueur noire qui contient la lignine dégradée est alors utilisée comme combustible pour maintenir la température du système [27].

2.7 Les thermoplastiques et fibres de bois courtes

Les résines thermoplastiques renforcées par des fibres courtes ont vu leur utilisation augmenter considérablement dans de nombreuses applications.

Les fibres courtes peuvent provenir de différents matériaux tels que la fibre de verre, de carbone, de basalte, ou encore de bois, et sont incorporées dans la résine pour renforcer la structure et améliorer les propriétés mécaniques du composite, figure 2.6. Les composites thermoplastiques à fibres de bois courtes sont particulièrement intéressants, car ils sont moins coûteux à produire que les composites continus renforcés par fibres. Cette technique de renforcement permet donc de produire des composites plus abordables tout en maintenant un niveau de performance suffisant pour de nombreuses applications.

Les composites thermoplastiques à fibres courtes offrent des avantages significatifs par rapport aux composites traditionnels renforcés par des fibres continues. Par exemple, la production de composites à fibres courtes nécessite moins d'équipements de transformation, de coûts en matériaux, et offre une plus grande flexibilité de conception. De plus, la réduction des coûts de production des composites thermoplastiques à fibres courtes permet leur utilisation dans un large éventail d'applications, y compris dans les secteurs de l'automobile, de la construction, de l'aérospatiale, et bien d'autres encore. Ces composites offrent une résistance et une durabilité accrues, ce qui les rend particulièrement adaptés pour des applications nécessitant une forte résistance aux chocs, à la corrosion, et aux vibrations. En outre, ils sont plus faciles à recycler que les composites renforcés par des fibres continues, ce qui les rend plus respectueux de l'environnement [28].

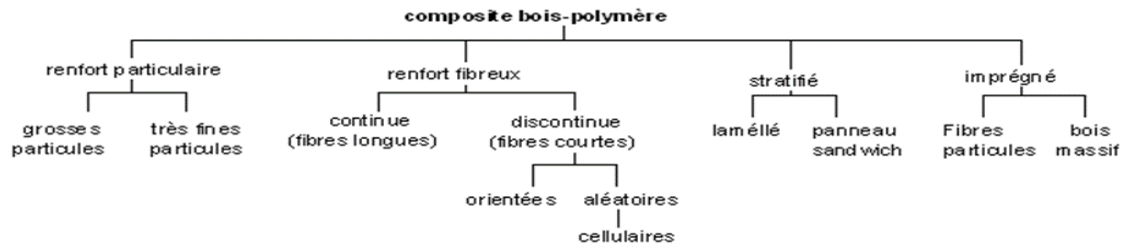


Figure 2.6 Classification des composites bois-polymères [29]

2.8 Vieillessement par rayonnement ultraviolet des composites à fibres naturelles

2.8.1 Le rayonnement ultraviolet

Les rayons UV sont présents dans les sources naturelles et artificielles, telles que le soleil, les lumières noires, les appareils de soudure, les lasers et les appareils de bronzage. L'intensité et les effets biologiques des rayons UV sur la peau varient en fonction de leur longueur d'onde. Les rayons UV sont classés en trois catégories : UV-A, UV-B et UV-C, en fonction de leur longueur d'onde, qui est respectivement de 400-315 nm, 315-280 nm et 280-100 nm. Plus la longueur d'onde des rayons UV augmente, moins ils sont nocifs et plus ils s'apparentent à la lumière visible, mais plus ils ont la capacité de pénétrer dans la peau. En revanche, lorsque la longueur d'onde diminue, l'énergie du rayonnement UV augmente, ce qui le rend plus destructif [30].

2.8.2 Phénomène de photo-dégradation des composites à fibres naturelles

Les rayons UV de la lumière solaire génèrent des radicaux libres à la surface des matériaux à base de polymères. Ces radicaux sont extrêmement actifs et attaquent les structures polymères. L'énergie de la lumière UV est généralement supérieure à la force des liaisons chimiques dans les polymères. Par conséquent, ces liaisons chimiques sont susceptibles de se rompre, ce qui entraîne une photo-dégradation, figure 2.7. D'autres facteurs environnementaux, tels que l'humidité, l'oxygène, la température et les polluants, peuvent augmenter considérablement le taux de photo-dégradation [31][32]. Le taux de biodégradation des matériaux composites dépend de la nature des composants et de la force de leur liaison, mais aussi des conditions environnementales par exemple : la

température, l'humidité et le pH du sol, la population microbienne et l'apport en nutriments. Le contact biologique se produit à l'interface matériau-environnement, c'est pourquoi la zone et les propriétés de la surface exposée jouent un rôle important. Une surface rugueuse avec un nombre élevé de groupes fonctionnels hydrophiles polaires est beaucoup plus encline à la biodégradation qu'une surface lisse, hydrophobe et inerte. Les charges naturelles, étant hydrophiles et plus biodégradables, augmentent l'adhésion des micro-organismes au matériau composite [33].

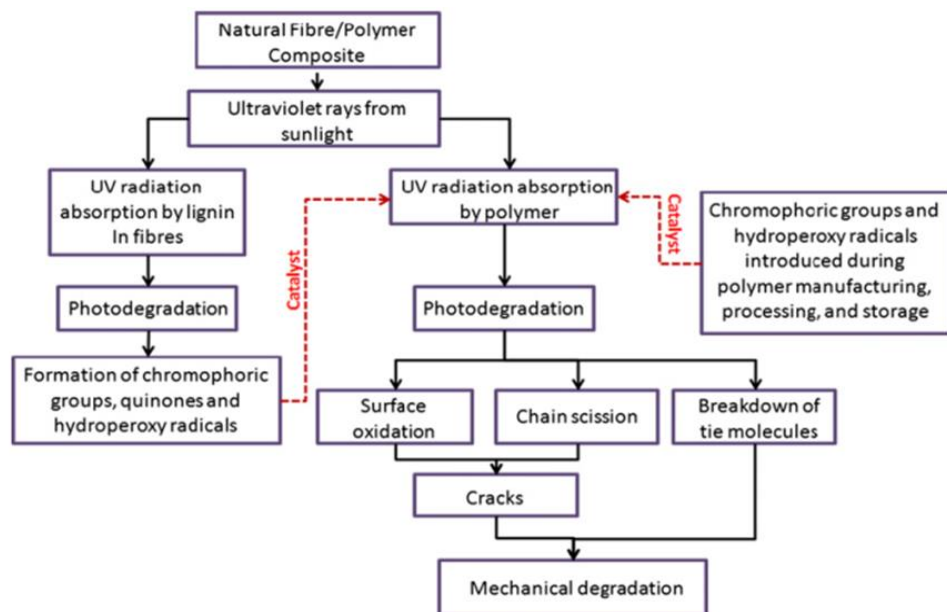


Figure 2.7 Dégradation par UV des matériaux composites à fibres naturelles [25]

2.8.3 Impact du vieillissement sur l'apparence visuelle

Le vieillissement peut avoir un impact significatif sur l'apparence visuelle des composites à fibres naturelles. Au fil du temps, les rayons UV et l'exposition aux intempéries peuvent provoquer des changements de couleur, des fissures, des déformations et une dégradation générale de la surface du matériau, figure 2.8. Ces changements peuvent affecter non seulement l'aspect esthétique du matériau, mais aussi sa résistance et sa durabilité. Par conséquent, l'évaluation de l'apparence visuelle est importante pour comprendre l'effet du vieillissement sur les propriétés physiques du matériau [34].

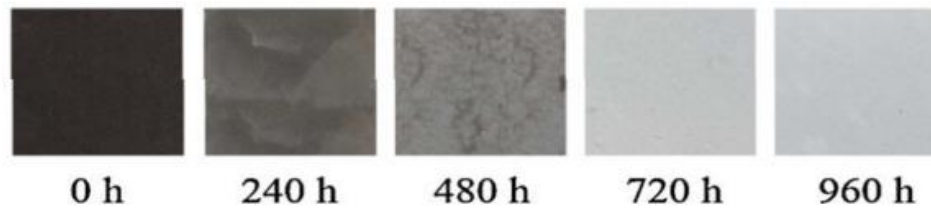


Figure 2.8 Évolution de la couleur de composites au cours d'un vieillissement accéléré [35]

2.8.4 Effet de vieillissement par rayonnement UV sur les propriétés mécaniques des composites à fibres naturelles

L'exposition aux rayons UV est un facteur important qui peut affecter la durabilité et les propriétés mécaniques des composites à base de fibres de bois. L'effet de vieillissement par rayonnement UV sur ces composites est un processus complexe qui peut causer des changements significatifs dans leur structure et leur performance mécanique [36] [37].

En effet, l'exposition aux rayons UV peut entraîner une altération de la structure moléculaire de la matrice polymère et des fibres de bois, ce qui peut conduire à une réduction de la résistance mécanique et de la stabilité dimensionnelle du matériau. Les rayons UV peuvent également induire des réactions chimiques dans le matériau, provoquant des modifications dans les liaisons entre les molécules. Ces changements peuvent affecter la rigidité, la résistance et la ténacité du matériau. En outre, l'exposition aux rayons UV peut également affecter la microstructure des composites à base de fibres de bois. Elle peut provoquer une rupture des liaisons entre les fibres de bois et la matrice polymère, entraînant ainsi une réduction de la résistance à la traction et à la flexion du matériau [38] [39].

Les rayons UV peuvent également causer des fissures dans le matériau, qui peuvent conduire à une augmentation de la perméabilité et de l'absorption d'eau, ce qui peut accélérer la dégradation du matériau. En ce qui concerne la résistance mécanique des composites à base de fibres de bois, plusieurs études ont montré que l'exposition aux

rayons UV peut réduire significativement la résistance à la traction et à la flexion, ainsi que le module d'Young du matériau. Cette réduction de la résistance mécanique peut être causée par une diminution de la liaison entre les fibres de bois et la matrice polymère, une altération de la microstructure du matériau, et des dommages causés par les rayons UV. Il est important de noter que la durée de l'exposition aux rayons UV peut également influencer les effets de vieillissement sur les propriétés mécaniques des composites à base de fibres de bois [40] [41].

Un travail trouvé dans la littérature évalue différentes propriétés mécaniques du polyéthylène à basse densité (LDPE) renforcé par des fibres de chêne 0 %, 10 %, 20 % et 30 % désignées respectivement par P1, P2, P3 et P4. Ces composites sont exposés à des rayons UV pendant 500h. La figure 2.9 montre les résultats du module d'élasticité en traction en fonction du temps de l'irradiation et du taux de fibres et la figure 2.4b montre l'influence du vieillissement par UV sur les résistances à l'impact de ces composites [42].

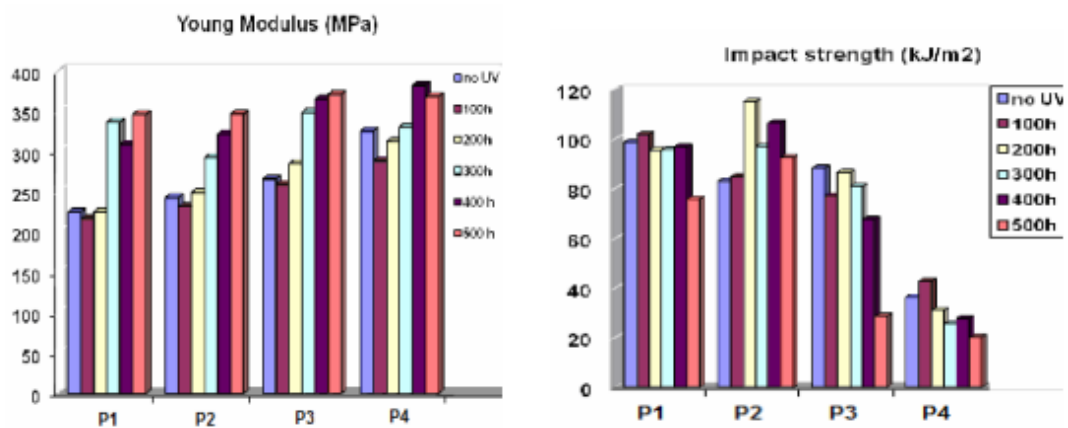


Figure 2.9 Variation des propriétés mécaniques (a) Valeurs du module d'élasticité en fonction de l'irradiation et du taux de fibres. (b) Influence du vieillissement par UV sur les résistances à l'impact

2.9 Test d'impact

La tour de chute est un équipement qui utilise un impacteur en forme d'hémisphère pour effectuer des mesures à l'aide de capteurs tels que des accéléromètres ou des capteurs de force, figure 2.10. Ce dispositif est fixé sur une traverse qui se déplace le long de rails de

guidage verticaux. L'impacteur est lâché à différentes hauteurs, avec la possibilité de modifier sa masse. L'échantillon est placé sur l'axe de l'impacteur et maintenu par un système de bridage, tandis qu'un mécanisme anti-rebond empêche l'impacteur de rebondir sur l'échantillon. En l'absence de frottement, l'énergie d'impact est égale à l'énergie cinétique de l'impacteur, qui correspond à la différence d'énergie potentielle gravitationnelle entre la hauteur à laquelle l'impacteur est lâché et la hauteur de l'impact, comme le montre l'équation suivante :

$$E_{imp} = \frac{1}{2}mv_{imp}^2$$

Avec m : la masse du poids tombant (impacteur + supporté) et V_{imp} : la vitesse lors de l'impact [43]. Il est possible d'obtenir d'autres données en plus de l'énergie d'impact si la tour de chute est instrumentée. En effet, si la tour de chute est équipée d'accéléromètres et de capteurs de force, de nombreux résultats sont exploitables et permettent une analyse beaucoup plus fine de l'impact. Les premiers résultats que l'on peut habituellement obtenir sont la déflexion maximale et résiduelle de l'échantillon, ainsi que la force en fonction du temps.

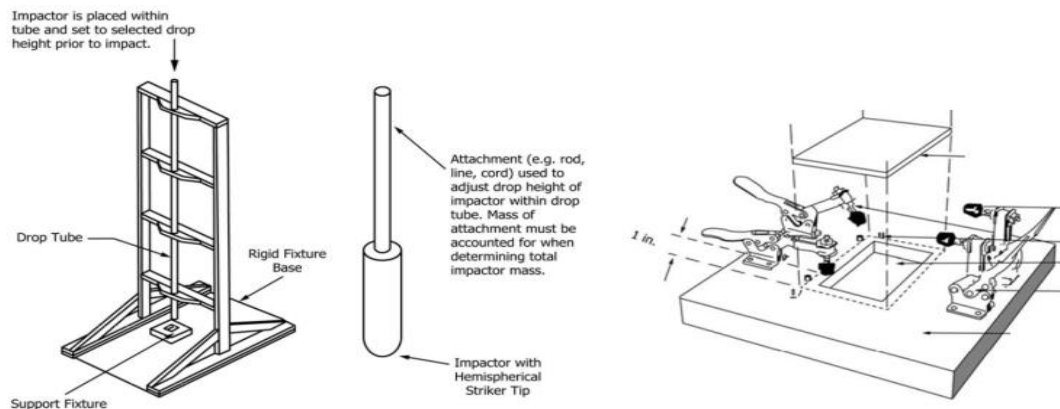


Figure 2.10 *Protocole expérimental du test d'impact à basse vitesse [44]*

La figure 2.11 illustre des courbes qui peuvent fournir des informations précieuses sur les propriétés mécaniques du matériau impacté .

La courbe de force en fonction du temps peut permettre de déterminer la force maximale supportée par le matériau et le temps nécessaire pour atteindre cette force maximale. La courbe de déplacement en fonction du temps peut donner une indication sur la déformation du matériau en fonction du temps, tandis que la courbe de force en fonction du déplacement peut permettre de déterminer la raideur du matériau et sa capacité à résister à la déformation. Enfin, la courbe d'énergie en fonction du temps peut fournir des informations sur la quantité d'énergie absorbée par le matériau lors de l'essai, ce qui peut être utile pour évaluer sa résistance à la rupture ou à la fatigue. En résumé, l'analyse de ces courbes peut aider à mieux comprendre les propriétés mécaniques du matériau testé et à optimiser sa conception ou son utilisation dans un contexte donné.

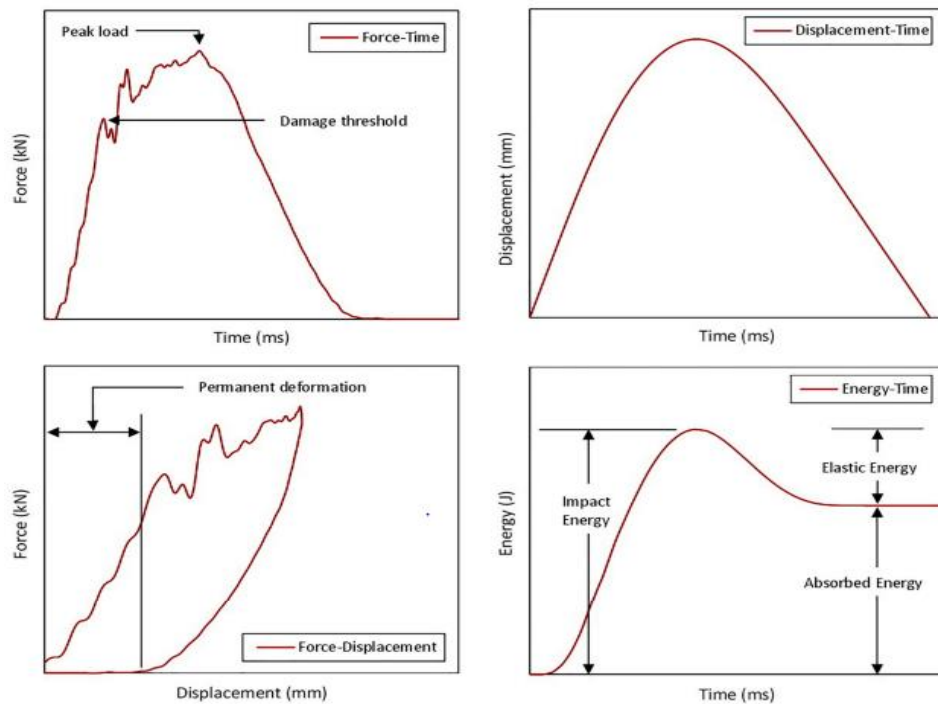


Figure 2.11 Courbes d'impact force-temps, déplacement-temps, force-déplacement et énergie-temps [45].

2.10 Test de traction

La plupart des matériaux présentent une relation linéaire entre la force ou la charge appliquée et l'allongement de l'échantillon au début de l'essai, figure 2.12. Cette région

linéaire est décrite par la « loi de Hooke », où la contrainte et la déformation sont proportionnelles, avec une constante appelée module d'élasticité ou module de Young, noté E , qui correspond à la pente de la ligne dans cette région. En d'autres termes, le module de Young mesure la rigidité d'un matériau et sa capacité à récupérer sa forme d'origine après avoir subi une contrainte.

Le module d'élasticité mesure la capacité d'un matériau à résister à la déformation. Cependant, cette mesure ne s'applique qu'à la région linéaire initiale de la courbe de traction. Dans cette région, si la charge est enlevée, le matériau reprendra sa forme d'origine sans déformation permanente. La limite élastique, également appelée limite proportionnelle, est le point où la courbe de traction cesse d'être linéaire et où une déformation permanente commence à se produire dans l'échantillon. À partir de ce point, toute augmentation de la charge ou de la contrainte provoquera une déformation permanente dans le matériau, même si la charge est enlevée. Ce comportement est appelé déformation plastique, et le matériau ne reviendra pas à son état initial sans contrainte. Pour calculer le module de Young, on utilise l'équation suivante :

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

Avec σ_1 et σ_2 sont respectivement les contraintes correspondant aux petites déformations $\epsilon_1 = 0.1 \%$ et $\epsilon_2 = 0.3 \%$.

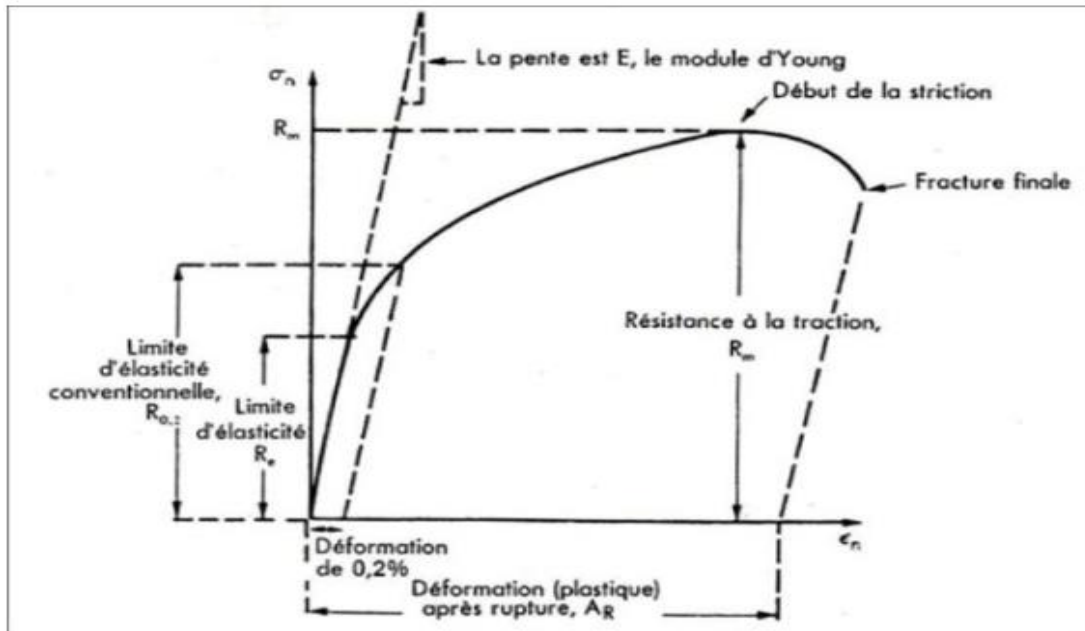


Figure 2.12 Courbes de traction contrainte-déformation [46]

2.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les composites à base de thermoplastiques et de fibres de bois, ainsi que leurs constituants chimiques et les procédés d'obtention des fibres de bois. Nous avons également examiné le vieillissement UV et son effet sur les propriétés mécaniques de ces composites.

Les composites à base de thermoplastiques et de fibres de bois offrent des perspectives prometteuses en tant que matériaux durables et respectueux de l'environnement. Les fibres de bois renforcent les composites, améliorant leur résistance mécanique tout en les rendant légers. Les thermoplastiques utilisés comme matrice offrent une bonne résistance à la déformation et une facilité de mise en forme.

La compréhension des constituants chimiques des composites est essentielle pour optimiser leurs performances. Les propriétés des fibres de bois, telles que leur composition

chimique, leur structure et leur morphologie, jouent un rôle clé dans les propriétés finales des composites.

Le vieillissement UV représente un défi pour ces composites, car il peut entraîner une dégradation des polymères et une détérioration des propriétés mécaniques. Il est donc important de prendre en compte les effets du vieillissement UV lors de la conception et de la fabrication de ces matériaux.

CHAPITRE III - MÉTHODOLOGIE

MATÉRIAUX ET TECHNIQUES D'ANALYSE

Les étapes méthodologiques suivies pour atteindre l'objectif principal de cette étude sont résumées dans la figure ci-dessous :

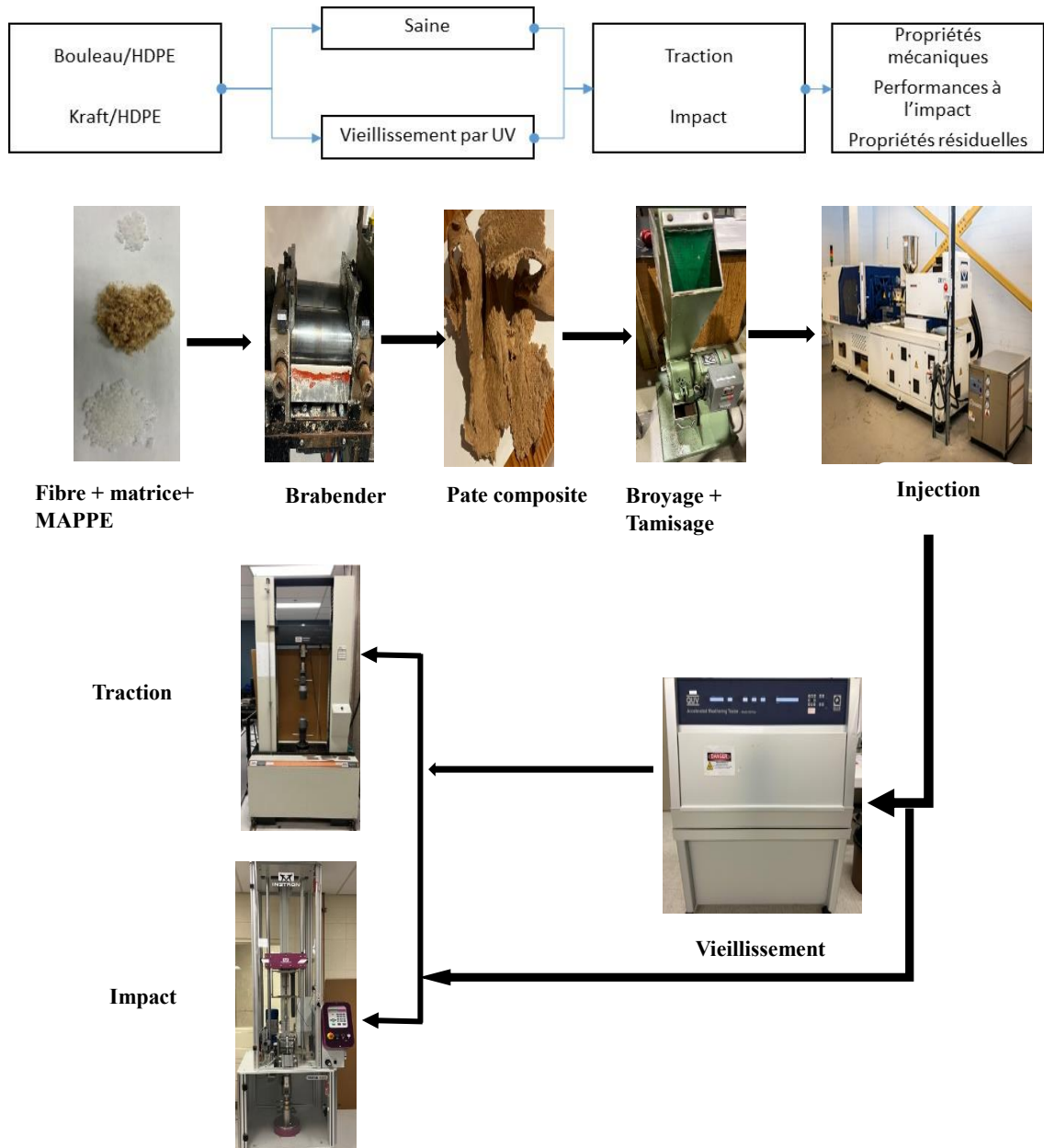


Figure 3.13 Diagramme de la méthodologie

3.1 Introduction

Le cadre méthodologique décrit le processus complet, de la fabrication jusqu'à l'analyse des données collectées. Les quatre premières étapes de fabrication sont réalisées au Centre Intégré en Pâtes et Papier (CIPP), tandis que la dernière étape et l'ensemble des tests sont effectués dans les laboratoires de génie mécanique de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Les matériaux utilisés ainsi que les quatre étapes de mise en forme sont détaillés dans la section fabrication.

Une description complète du banc d'essai spécialement conçu pour ce projet est également présentée, y compris les équipements nécessaires à son utilisation.

3.2 Préparation des fibres de bouleaux

Le bouleau jaune a été préparé à l'I2E3 de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). Le procédé de fabrication de pâte thermomécanique (TMP, un procédé d'extraction mécanique) a été utilisé pour fabriquer les fibres. Ce procédé utilise des copeaux de bois soumis à une température supérieure à 100 °C sous vapeur pour ramollir les fibres. Le défibrage sous pression s'ensuit dans un raffineur équipé de deux disques rotatifs tournant à grande vitesse. C'est l'effet des cycles successifs de compression et de décompression qui produit la pâte avec un rendement d'environ 90 %. La fibre de bois a été séchée à 80 °C dans un four à circulation d'air pendant 24 h, puis broyée à une taille de 20 à 60 mailles avant utilisation.

3.3 Préparation de la pâte kraft

La pâte kraft a été préparée à l'I2E3 de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). Le procédé de fabrication des fibres de kraft est un procédé de défibrillation chimique utilisé pour produire des fibres de bois de grande taille à partir de bois de haute qualité. Le bois est d'abord traité chimiquement pour dissoudre partiellement la lignine, la substance qui relie les cellules du bois. Le bois traité chimiquement est alors introduit dans un broyeur où il est soumis à de fortes pressions pour séparer les fibres.

Les fibres sont recueillies sous forme de pâte et sont ensuite refroidies et séchées avant d'être pressées en panneaux de fibres de bois orientées (OSB) ou en panneaux de fibres de bois lamellées-croisées (LVL).

3.3.1 Préparation des fibres de kraft

La pâte à papier est dispersée dans l'eau distillée, pendant un minimum de vingt-quatre heures avant désintégration.

3.3.2 Désintégration

La pâte bien imbibée d'eau pendant 24 heures et ensuite déposée dans un désintégrateur pendant 5 minutes à 1000 RPM. Celui-ci va désintégrer la pâte afin de préparer une suspension homogène de fibres (Figure 3.2).



Figure 3.14 Désintégrateur

3.4 Caractérisations des fibres

3.4.1 Taille des fibres

On a utilisé un analyseur de la qualité de la fibre (L&W FIBER TESTER) de la compagnie lorentzen & wettre (figure 3.3). Selon la norme ISO 16065-2, une dilution des fibres dans l'eau à une concentration d'environ 3 % a été préparée. L'analyseur permet de mesurer plusieurs paramètres morphologiques, dont la longueur et le diamètre des fibres.



Figure 3.15 Analyseur de la qualité de la fibre (L&W FIBER TESTER)

3.4.2 Le taux de lignine

Le taux de lignine est déterminé par la méthode de Klason selon le protocole suivant, Figure 3.4 :

a) L'échantillon sec de fibres de kraft et bouleau (1g) est mis en suspension dans l'acide sulfurique à 72 % (15 ml) pendant 2 h à température ambiante.

b) L'hydrolyse est poursuivie après dilution à 3 % et on maintient la solution à reflux pendant 6 heures.

c) Après cette hydrolyse, on laisse déposer la solution pendant une nuit avant de filtrer le précipité sur un creuset filtrant n°4 préalablement séché et taré.

d) Le précipité est lavé abondamment à l'eau chaude afin d'éliminer toute trace d'acide, puis placé dans une étuve à 105 °C jusqu'à stabilisation de son poids. Le taux de lignine est alors déterminé par gravimétrie.

Les lignines sont insolubles dans l'eau et dans les acides. Elles sont partiellement solubles dans les solutions alcalines et elles réagissent avec les agents oxydants. Le traitement des fibres par l'acide sulfurique concentré permet la dissolution de toutes les composantes de la fibre à l'exception de la lignine [47].

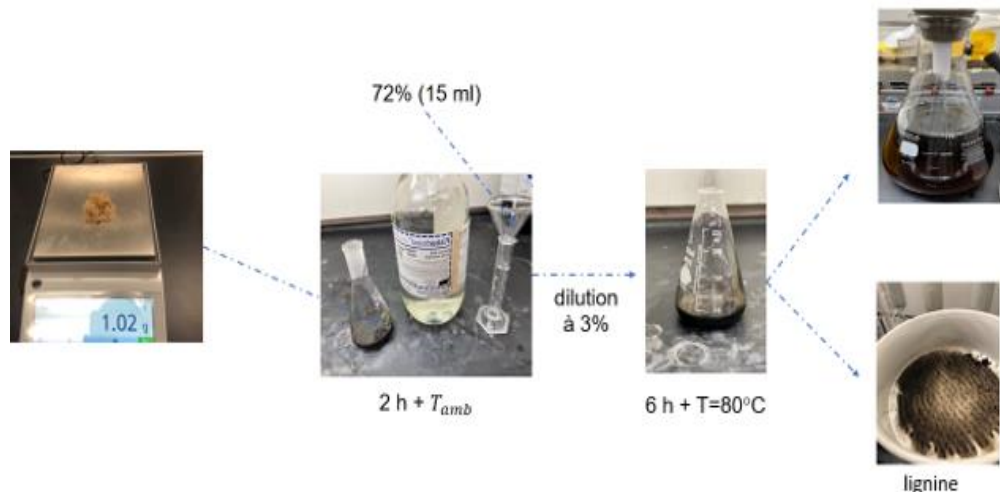


Figure 3.16 *Protocole de la méthode de Klason*

3.4.3 Résultats

$$L = (a/E) \times 100$$

$$L = 12 \% \text{ (Bouleau);}$$

$$\approx 0 \% \text{ (Kraft)}$$

a : masse de la lignine récupérée

E : masse de l'échantillon

L : lignine extraite en pourcentage

3.5 Préparation de la pâte composite

Le processus de préparation de la pâte composite implique le mélange de différents composants, notamment le Polyéthylène haute densité (HDPE) avec un indice de fusion de 18 g / 10 min basés sur D-1238 et une densité de 0,953 g / cc conformément à ASTM D-1505, fourni par Raplast Inc. Le MAPE est également ajouté en proportion massique spécifique au HDPE, puis les deux sont fondus ensemble sur des rouleaux chauffés à une température de 170 °C, figure 3.5. Ensuite, la fibre de bois est mélangée avec le HDPE restant à une vitesse de 60 tr / min pendant une durée de 7 minutes. Le mélange est retiré du rouleau et remélangé à cinq reprises pendant 3 minutes chacune pour obtenir une pâte composite uniforme. La pâte est ensuite découpée en bandes à l'aide d'un couteau pour s'adapter au broyeur avant d'être refroidie et déchiquetée à l'aide d'une meuleuse industrielle. La teneur en fibre de bois est contrôlée et ajustée à des proportions massiques de 10 %, 20 % et 30 %, selon les besoins spécifiques de l'application envisagée.



Figure 3.17 Rouleaux Brabender

3.5.1 Mise en granules

Une fois la pâte composite uniforme obtenue, elle est introduite dans un broyeur à couteau rotatif pour être transformée en granules de la taille désirée, figure 3.6. Dans ce processus, la pâte est soumise à des forces de compression et de cisaillement élevées qui permettent de briser la matière en petits morceaux. Les granules peuvent ensuite être tamisés pour séparer les particules plus petites et obtenir des granules homogènes de la taille souhaitée. Cette étape de préparation des granules est cruciale pour assurer une distribution homogène des fibres dans le matériau final.



Figure 3.18 Le granulateur

3.6 L'injection

La phase d'injection de la fabrication des composites est assurée par une presse à injection de haute précision ZE 900 de ZHAFIR Plastics Machinery, d'une capacité de 100 tonnes (figure 3.7). Cette presse est équipée d'un moule spécialement conçu pour produire des échantillons de traction et d'impact d'une qualité optimale. La phase d'injection permet de mettre en forme les granules de la pâte composite uniforme précédemment préparée.

Grâce à des paramètres de pression et de température soigneusement contrôlés, la presse à injection permet d'obtenir des pièces composites de grande qualité, dotées de propriétés mécaniques et physiques optimales.



Figure 3.19 Machine de 100 tonnes de ZE 900 de ZHAFIR Plastics Machinery

3.7 Vieillissement artificiel

Afin d'évaluer l'effet du rayonnement UV sur les propriétés des matériaux composites, une méthode de vieillissement accéléré a été mise en place à l'aide d'un équipement QUV/SE de Q-Lab Co., USA, équipé de lampes fluorescentes UVA-340 (rayonnement UV à une longueur d'onde de 340 nm) (Figure 3.8). Cette technique permet de simuler les effets du vieillissement UV sur les échantillons en utilisant huit lampes UV, ce qui assure une bonne corrélation avec le vieillissement naturel. Les échantillons ont été fixés sur des supports d'éprouvette et exposés au rayonnement UV à une intensité fixée à $0,89 \text{ W/m}^2/\text{nm}$, tandis que la température au cours du cycle de rayonnement a été maintenue à $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Des prélèvements ont été effectués à des intervalles de 0, 240, 480, 720 et 1440 heures afin de suivre l'évolution des propriétés des échantillons.

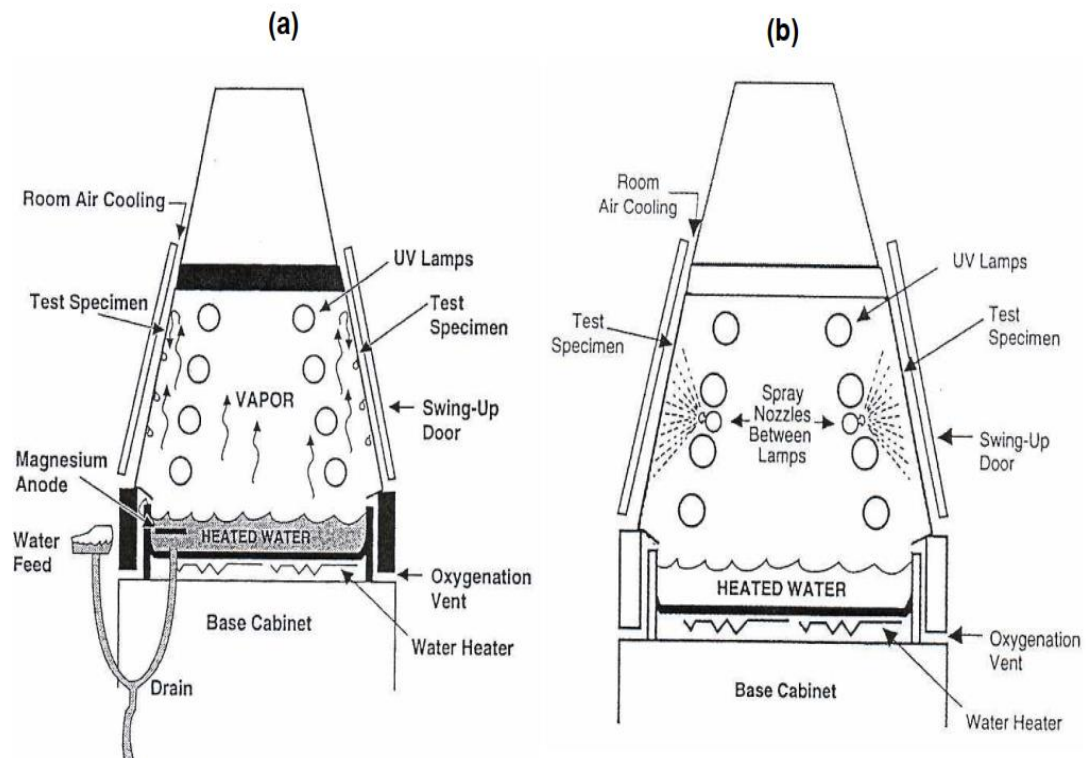


Figure 3.20 Schématisation d'un QUV (a) en mode condensation (b) en mode aspersion (pulvérisation)

3.8 Test de couleur

L'évaluation de la couleur des échantillons non vieillis et vieillis a été effectuée. La couleur a été déterminée à l'aide d'un capteur Nix Mini (figure 3.9) selon le système CIE 1976 (L^* , a^* , b^*) ; où L^* (de 0 à 100) indique un matériau éclaircissant, et a^* et b^* sont les positions de la chromaticité sur les axes de - 300 à + 300, qui sont les axes vert-rouge et bleu-jaune, respectivement. Étant donné que le système L^* , a^* et b^* est uniforme, il permet de calculer la différence de couleur entre les échantillons non altérés et altérés. Le changement de couleur total (ΔE) a été calculé conformément à la norme ASTM D2244 en utilisant $\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$.



Figure 3.21 Spectrophotomètre

3.9 Analyse par microscope électronique à balayage

L'analyse par MEB est une technique utile pour étudier les propriétés de surface des composites à fibres naturelles qui se produisent pendant le vieillissement, ce qui peut aider à mieux comprendre les mécanismes de dégradation et à améliorer la durabilité des matériaux à base de fibres naturelles. Les observations, effectuées dans les laboratoires du CIPP (Centre d'innovation des produits cellulosiques et papiers), de l'Université de Québec à Trois-Rivières, utilisent un MEB (Microscopie Électronique à Balayage) HITACHI dans le cadre de cette recherche, figure 3.10.

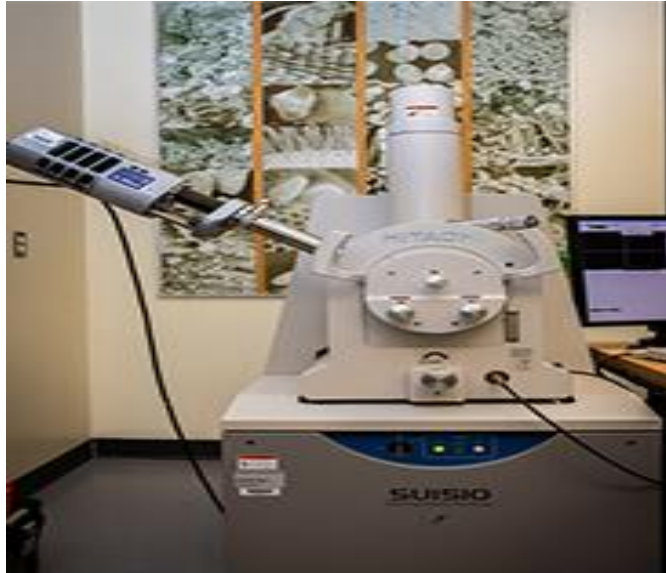


Figure 3.22 Microscope électronique à balayage

3.10 Test de rugosité

L'évaluation de la rugosité de surface est également importante pour étudier les effets du vieillissement sur les composites à fibres naturelles. En utilisant l'appareil SurfTest-211 de Mitutoyo, il est possible de comparer la rugosité de surface des échantillons vieillis et non vieillis pour évaluer l'impact du vieillissement sur la surface du matériau, figure 3.11. Les résultats de ces mesures peuvent fournir des informations précieuses sur l'effet du vieillissement sur les propriétés physiques du matériau, notamment en ce qui concerne la résistance à la corrosion et la durabilité. Cette évaluation peut aider à améliorer la conception et la durabilité des composites à fibres naturelles en optimisant le processus de vieillissement pour obtenir des performances et une durée de vie maximales.



Figure 3.23 Rugosimètre

3.11 Test de traction

Les essais de traction des échantillons ont été réalisés dans des conditions de température ambiante à l'aide d'un appareil de contrôle Instron (modèle LM-UI50, Figure 3.12). La machine Instron était équipée d'une cellule de charge de 50 kN pour mesurer la force appliquée lors de l'essai de traction. Pour enregistrer l'évolution de la déformation, un extensomètre de 50 mm a été connecté au système d'acquisition de données de la machine et fixé à la section de longueur de jauge de l'échantillon. La vitesse d'essai était de 1 mm / min. Les propriétés de traction, telles que la contrainte maximale et la déformation à la rupture, ont été déterminées. Afin de garantir la fiabilité des résultats, trois répétitions ont été effectuées pour chaque prélèvement et la moyenne des résultats a été considérée pour l'interprétation des données.

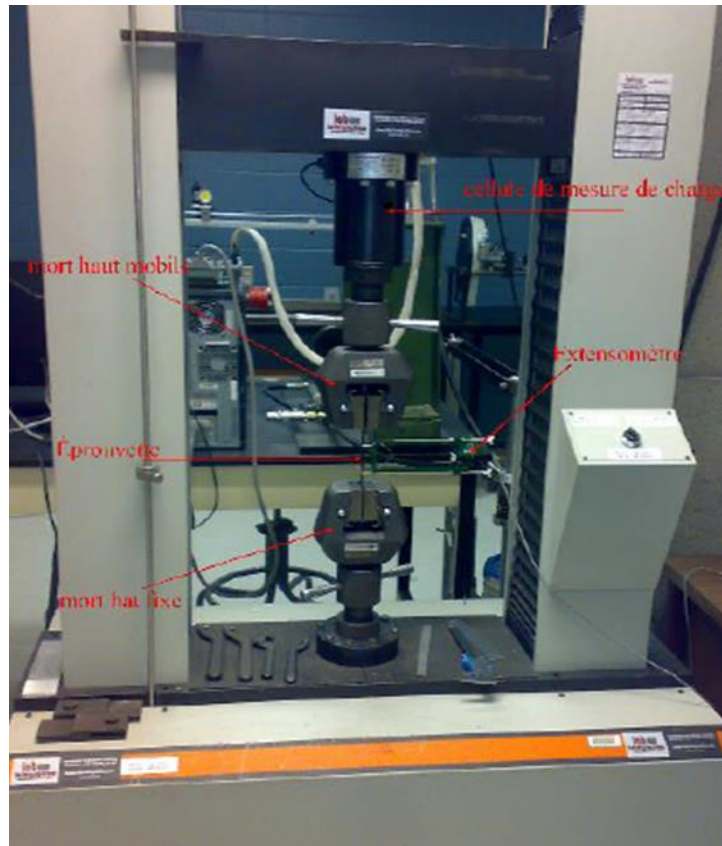


Figure 3.124 Machine de traction

3.12 Test impact à basse vitesse

Les essais d'impact ont été réalisés à basse vitesse conformément à la norme ASTM D5628, qui spécifie les méthodes d'essai pour mesurer la résistance des matériaux composites à la rupture par impact à basse vitesse. Les échantillons ont été testés à l'aide d'une machine Instron CEAST 9350 équipée d'un capteur d'acquisition de 22-KN, avec une énergie d'impact de 2 J, figure 3.13. Trois répétitions ont été effectuées pour chaque prélèvement afin d'assurer la fiabilité des résultats. La moyenne des résultats a été considérée pour l'interprétation. Des données précises et fiables ont été collectées pour évaluer la résistance des échantillons composites à la rupture par impact à basse vitesse.



Figure 3.25 La machine d'impact

3.13 Conclusion

Dans ce chapitre méthodologique, on a couvert les principales techniques utilisées dans les laboratoires de l'université pour la réalisation du projet. Cela inclut la caractérisation des fibres, la fabrication de la pâte composite, l'injection, le vieillissement UV et les tests mécaniques. La caractérisation des fibres a fourni des informations sur leur taille et leur distribution. La fabrication de la pâte composite a impliqué un mélange précis des fibres de bois avec la matrice thermoplastique. L'injection a permis de mouler les composites en pièces finales. Le vieillissement UV a simulé les effets du vieillissement accéléré. Les tests mécaniques ont évalué les performances du composite. En résumé, ces techniques ont été cruciales pour la fabrication et l'évaluation des composites à base de thermoplastiques et de fibres de bois.

CHAPITRE IV - RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Résultats de la taille des fibres

Les résultats de l'analyse révèlent de manière évidente que la taille des fibres de kraft est supérieure à celle des fibres de bouleau. Plus précisément, la taille moyenne des fibres de kraft a été mesurée à 1,676 mm, tandis que celle des fibres de bouleau a été évaluée à 1,099 mm, figure 4.1.

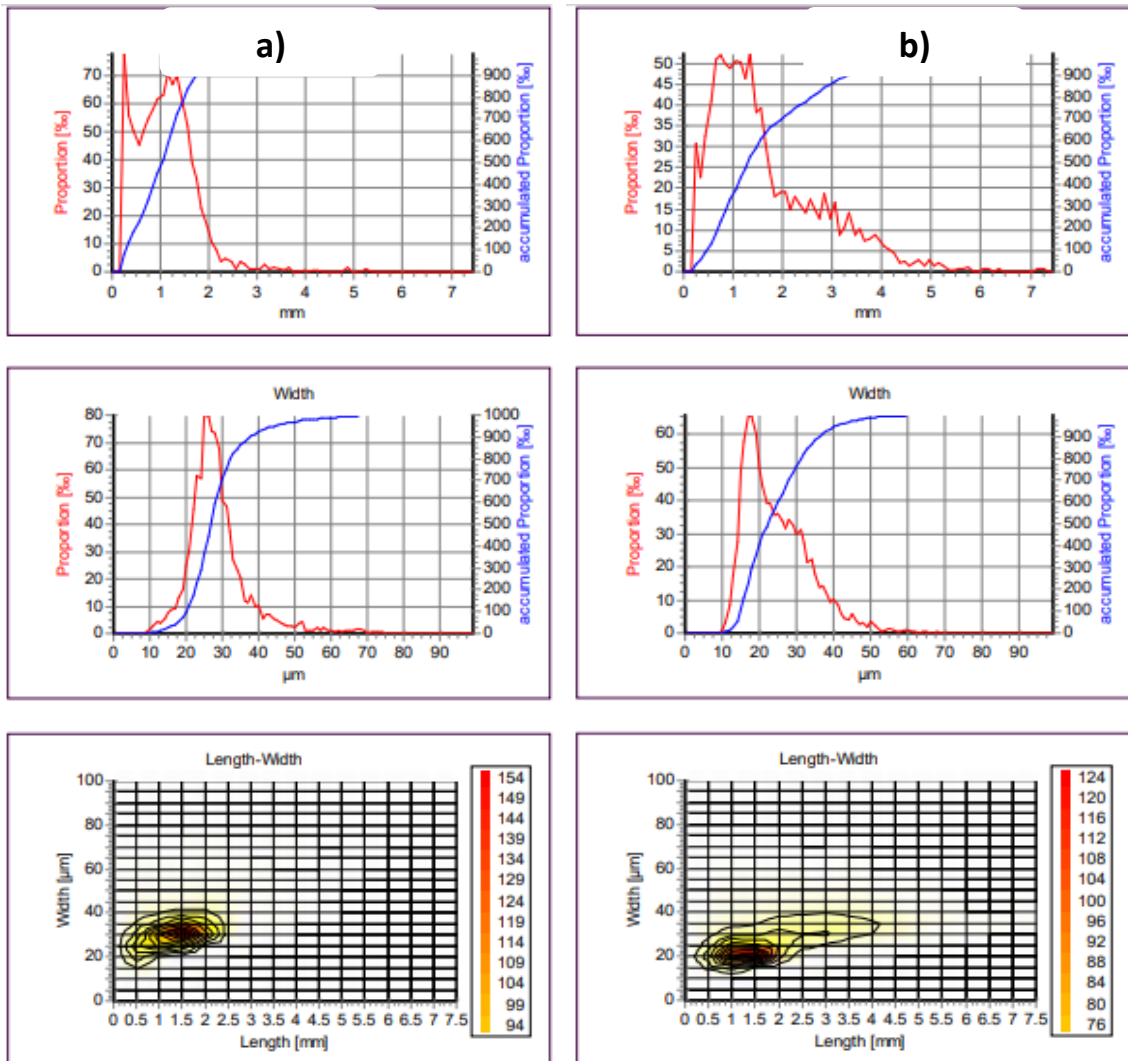


Figure 4.26 La taille des fibres a) fibre de bouleau, b) fibre de kraft

4.2 Test de couleurs

En effet, il est clair que le pourcentage de fibres dans le composite est important en ce qui concerne l'exposition aux rayons UV. Cette observation est confirmée par le fait que le changement de couleur devient précoce à 30 % de fibres par rapport à 20 % et 10 %. Cela indique que la quantité de fibres a un impact significatif sur la résistance du composite aux rayons UV.

Effectivement, il est observé que le changement de couleur pour les composites à base de fibres de bouleau est plus important que celui des composites à base de fibres de kraft lorsqu'ils sont exposés aux UV. Cela suggère que le taux de lignine dans les fibres joue un rôle très important dans le changement de couleur induit par l'exposition aux rayons UV. En général, une plus grande quantité de lignine peut offrir une meilleure résistance aux rayons UV, tandis qu'une quantité plus faible peut conduire à une dégradation plus rapide des matériaux sous l'exposition aux UV. Figures 4.2. 4.3.

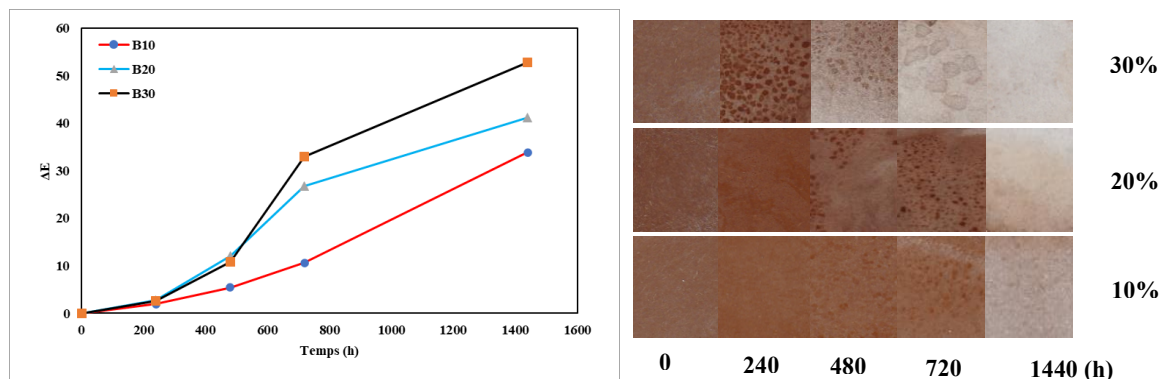


Figure 4.27 *Évolution des changements de couleur et de luminosité en fonction du temps d'exposition des composites à base de fibre de bouleau*

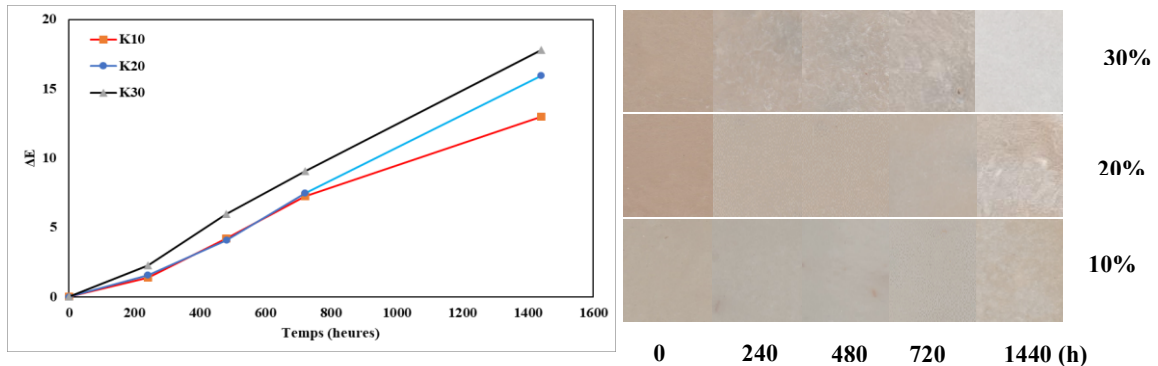


Figure 4.28 *Évolution des changements de couleur et de luminosité en fonction du temps d'exposition des composites à base de fibre de kraft*

4.3 Résultats MEB (microscope électronique à balayage)

Les résultats obtenus par le microscope électronique à balayage (MEB) montrent que les éprouvettes de kraft, qui ne contiennent pas de lignine, présentent des fissures et des dommages plus importants sous l'effet des rayons UV que les éprouvettes de bouleaux qui contiennent une certaine quantité de lignine (12 %), figure 4.4.

La lignine joue un rôle important dans la protection contre les rayons UV en agissant comme un inhibiteur. Cela permettra de ralentir le vieillissement et l'ABSORPTION des UV sur la surface exposée au rayonnement ultraviolet. La présence de la lignine dans le composite avec des fibres de bouleaux présente des surfaces moins endommagées moins fissurées que les composites avec des fibres krafts.

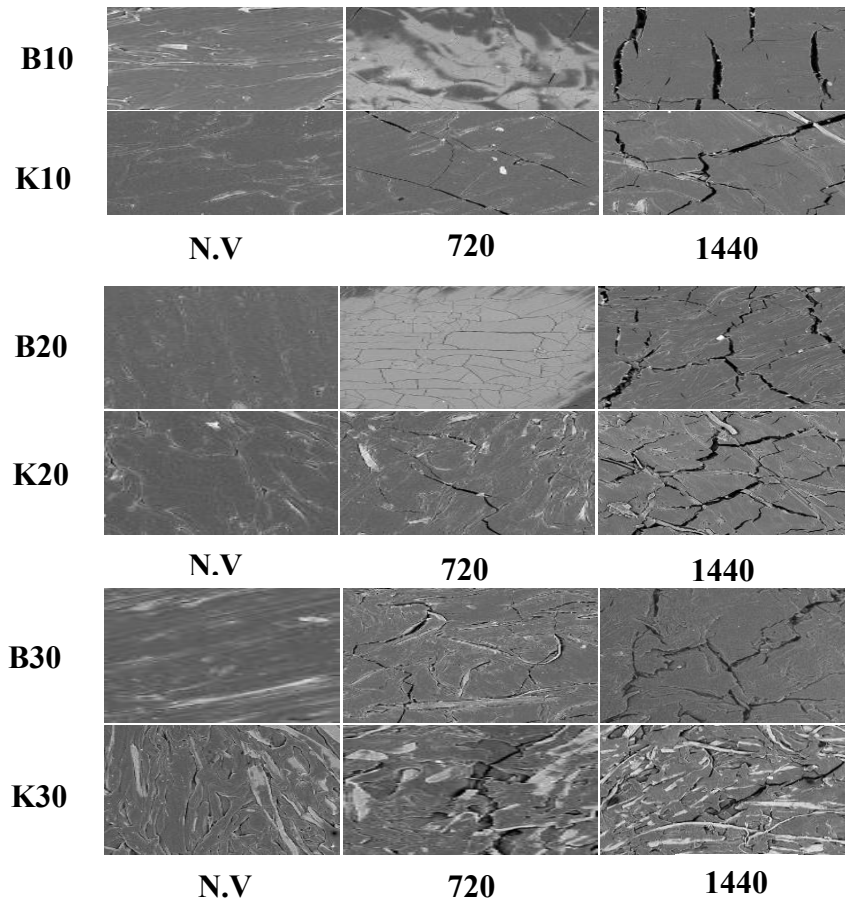


Figure 4.29 Évolution de l'état de la surface des deux composites en fonction du temps d'exposition

4.4 Test de rugosité

L'évolution de la rugosité moyenne des échantillons, en fonction du temps d'exposition, est présentée dans les figures 4.5 et 4.6. L'augmentation de la rugosité attribuée à l'augmentation de la proportion de la fibre et la durée d'exposition des biocomposites à l'irradiation UV, entraînant ainsi une photo-oxydation, ainsi que la scission de la chaîne polymère et des microfissures de surface. L'apparition de ces dernières a entraîné une augmentation de la rugosité des biocomposites.

En outre, le bouleau présentait relativement moins de surfaces rugueuses, ce qui pourrait être dû à l'effet antioxydant de la lignine. En moyenne, les fibres de bouleaux contiennent 12 fois plus de lignine que les fibres de kraft. Après 1440 h d'exposition, le kraft présentait un Ra supérieur à celle de fibre de kraft.

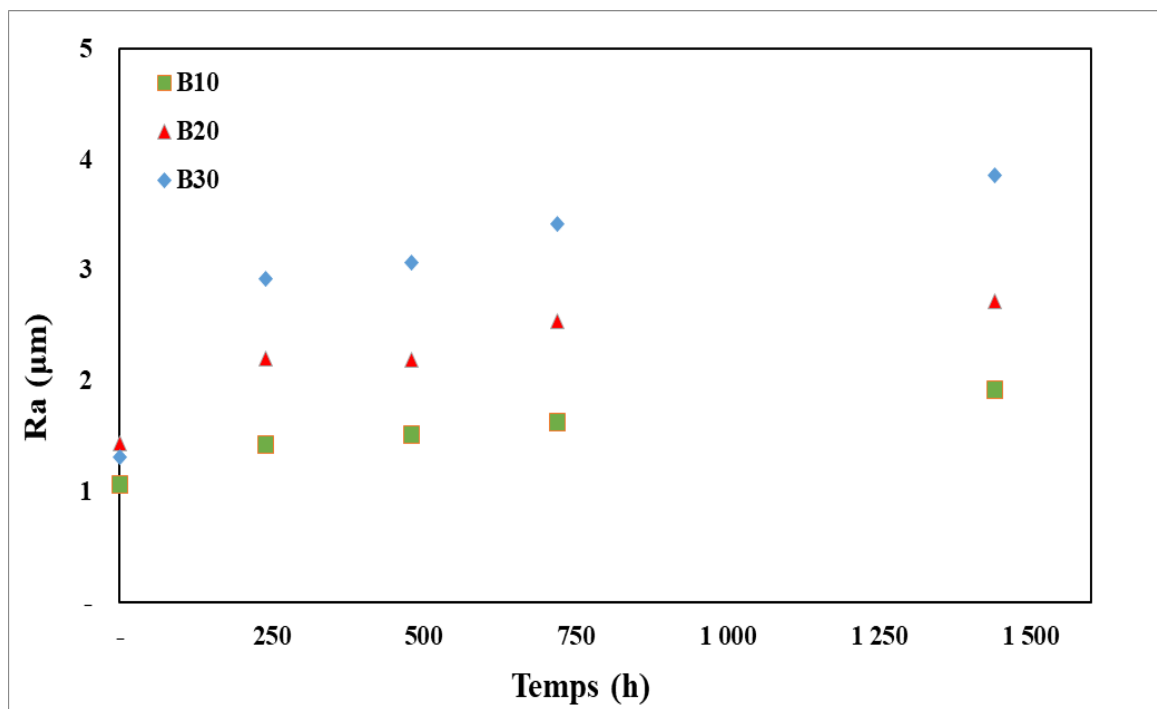


Figure 4.30 L'évolution de la rugosité moyenne (Ra) du composite à base de fibre de bouleau

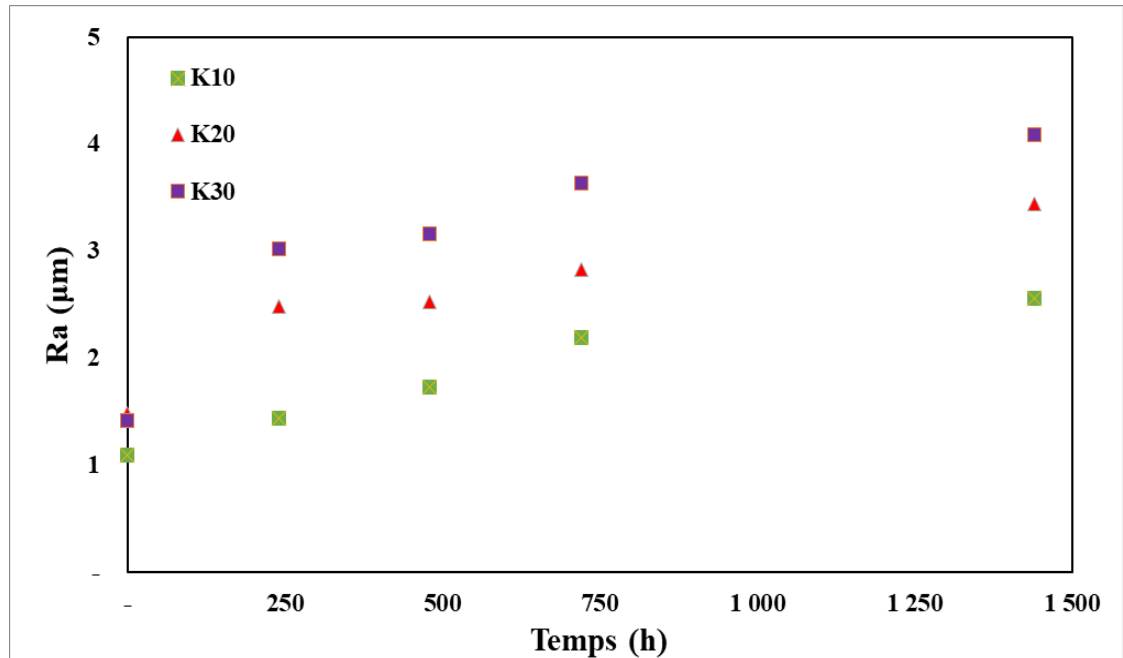


Figure 4.31 L'évolution de la rugosité moyenne (Ra) du composite à base de fibre de kraft

4.5 Résultats de traction avant vieillissement

Les essais de traction sont réalisés conformément aux normes établies en laboratoire dans des conditions de température et d'humidité normales, en utilisant des éprouvettes équipées d'un extensomètre et en appliquant une vitesse d'avance de 2 mm/min. Le module de Young est déterminé à partir de la partie linéaire de la courbe qui représente les contraintes appliquées sur le matériau en fonction des déformations.

Les résultats présentés dans les deux figures 4.7 et 4.8 indiquent clairement que l'ajout de fibres de bois dans les composites de HDPE entraîne une augmentation significative de la résistance maximale et du module élastique du composite, tandis que la déformation à la rupture diminue. Plus précisément, les composites de bouleau montrent une augmentation de la résistance maximale de 75 % (de 25,83 à 45,32 MPa) et une augmentation de 118 % du module élastique (de 1,41 à 3,08 GPa) lorsque la proportion de fibres de bois est augmentée de 10 % à 30 %. De même, les composites de kraft ont une augmentation de

69 % de la résistance maximale (de 25,26 à 42,73 MPa) et une augmentation de 102 % du module élastique (de 1,51 à 3,05 GPa) pour la même augmentation de proportion de fibres.

Les résultats montrent aussi que les composites de bouleau et de kraft ont une diminution significative de la déformation à la rupture lorsqu'on augmente la proportion de fibres de bois de 10 % à 30 %. Les composites de bouleau ont connu une réduction de 88 % de la déformation à la rupture, passant de 36,66 % à 4,10 %, tandis que les composites de kraft ont connu une réduction de 80 %, passant de 31,39 % à 6,17 %. Tableau 4.1.

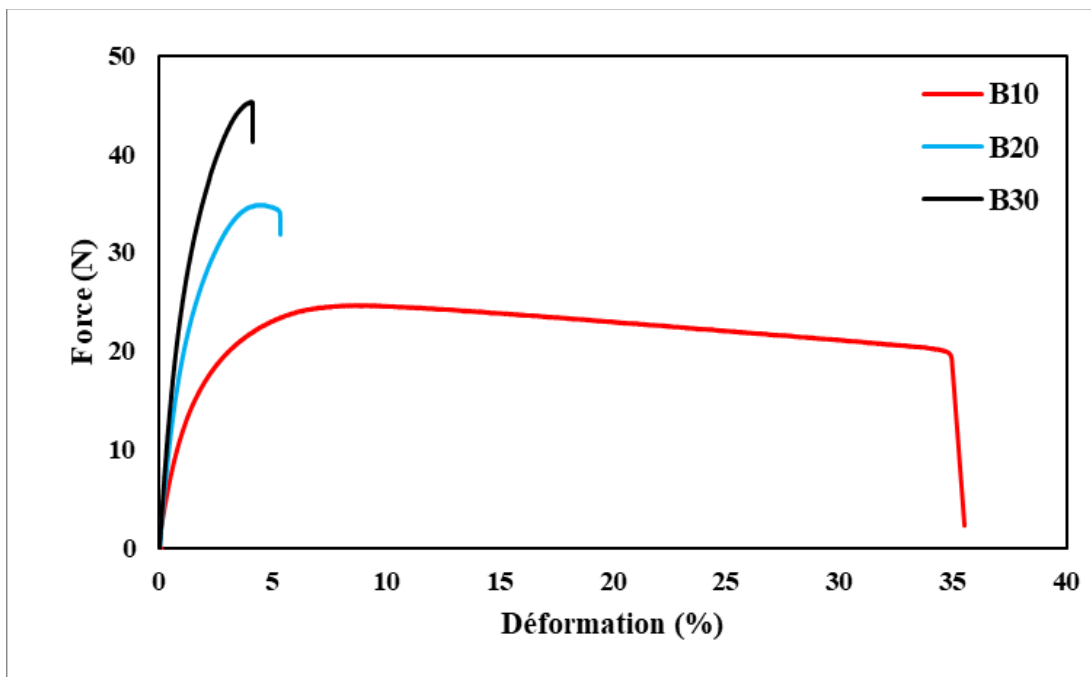


Figure 4.32 Courbe contrainte-déformation en fonction du taux de fibre de bouleau des éprouvettes saines

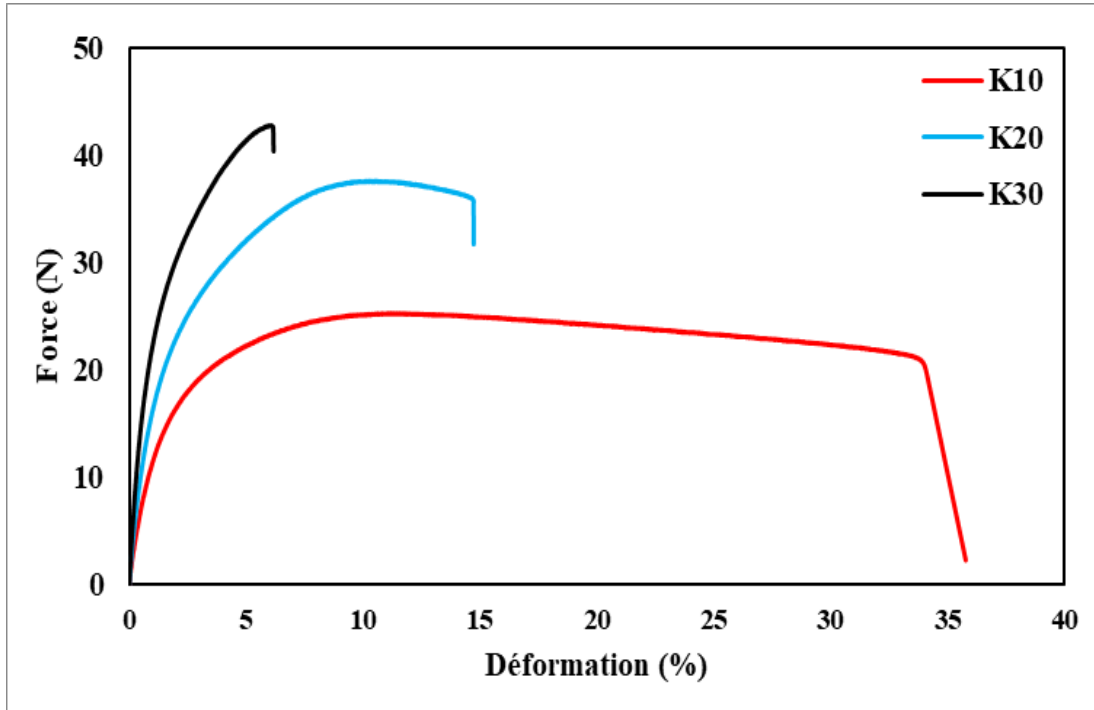


Figure 4.33 Courbe contrainte-déformation en fonction du taux de fibre de kraft des éprouvettes saines

Tableau 4.1 Propriétés mécaniques en traction des composites de bouleau et de kraft avant vieillissement

	Éprouvette	UV (h)	E (GPa)	σ_{\max} (MPa)	ϵ_{rup} (%)
Bouleaux	B10	00	1,41	25,83	36,66
	B20	00	2,41	34,88	5,33
	B30	00	3,08	45,32	4,10
Kraft	K10	00	1,51	25,26	31,39
	K20	00	2,14	32,99	12,04
	K30	00	3,05	42,73	6,17

L'ajout de fibres de bois dans les composites de HDPE entraîne une diminution de la mobilité des molécules de HDPE, ce qui se traduit par une réduction de la déformation à la rupture.

Les fibres de bois, en raison de leur nature fibreuse, ont une structure qui s'intègre dans le réseau de HDPE, ce qui conduit à une interaction physique étroite entre les deux matériaux. Cette interaction physique restreint la mobilité des chaînes moléculaires de HDPE, limitant ainsi leur capacité à se déformer sous contrainte. En conséquence, l'ajout de fibres de bois renforce les propriétés mécaniques du composite, augmentant la résistance maximale et le module élastique tout en réduisant la déformation à la rupture. Ces résultats mettent en évidence l'importance de l'interaction entre les composants des composites pour obtenir des matériaux composites performants.

4.6 Résultats d'impact avant vieillissement

Les figures 4.9 et 4.10 illustrent le comportement des matériaux composites HPDE-FIBRE DE BOULEAUX et HDPE-FIBRE DE KRAFT avant exposition aux UV, lors de l'essai d'impact avec une énergie d'impact de 2 J, en traçant la force en fonction du déplacement.

La phase d'absorption, où le matériau absorbe l'énergie de l'impact, est représentée par la partie ascendante de la courbe, tandis que la phase de restitution partielle, où une partie de l'énergie cinétique est restituée sous forme de rebond, est représentée par la partie descendante.

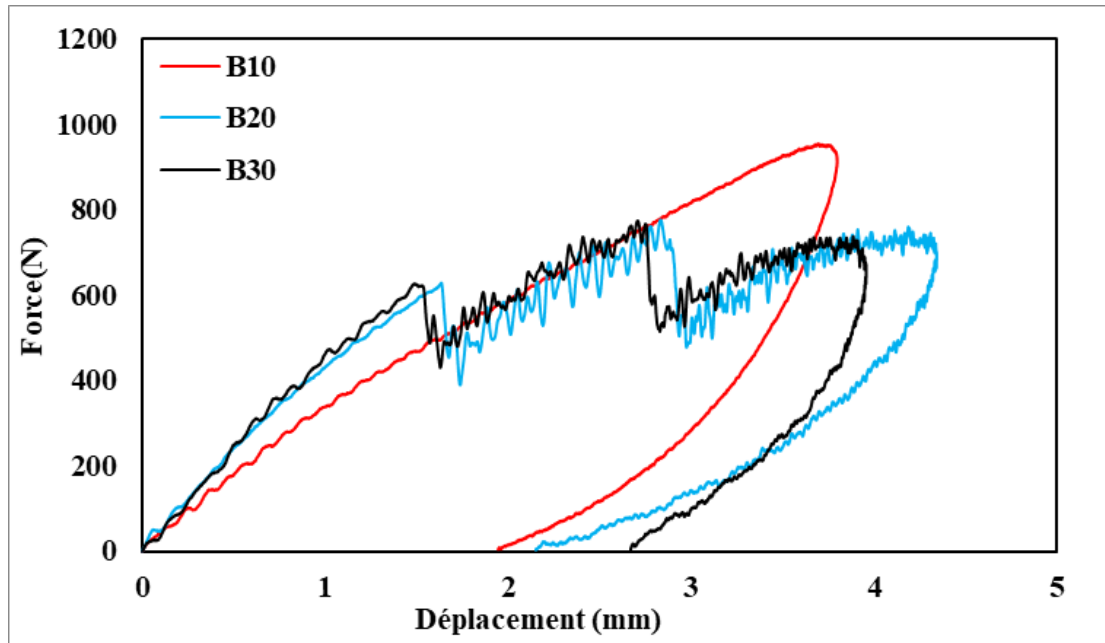


Figure 4.34 Courbe force-déplacement en fonction du taux de fibre de bouleau des éprouvettes de sains?

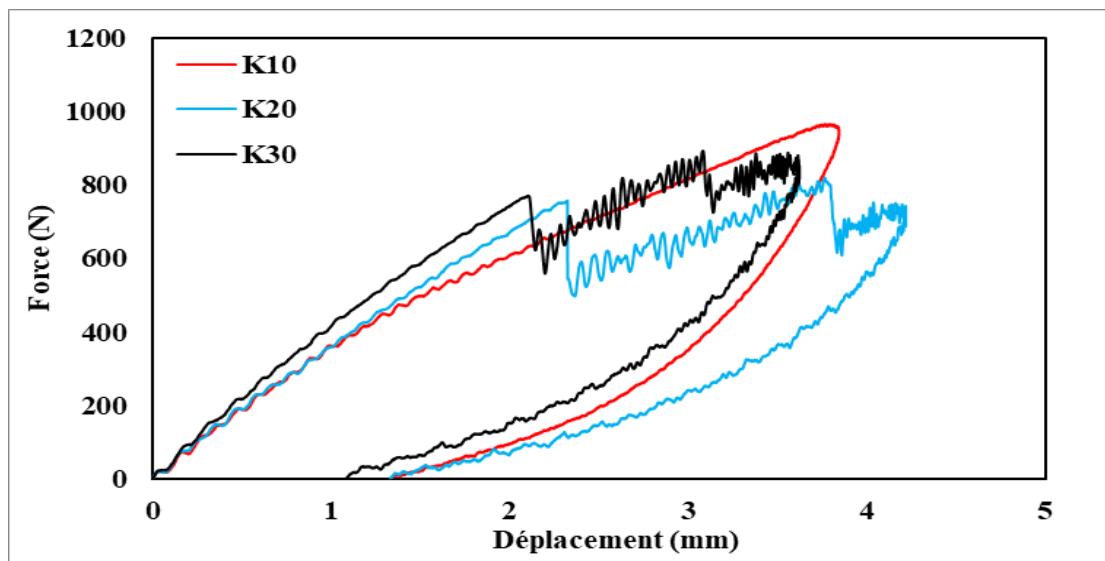


Figure 4.35 Courbe force-déplacement en fonction du taux de fibre de kraft des éprouvettes sains.

Le tableau 4.2 présente les données sur le déplacement maximal, la force maximale et l'énergie absorbée pour les différents composites testés. Les résultats indiquent que le composite contenant 10 % de fibres de bouleau a une force maximale de 1013,52 N, un déplacement maximal de 3,6 mm et une énergie absorbée de 1,47 J.

Pour le composite contenant 20 % de fibres de bouleau, la force maximale est de 921,90 N, le déplacement maximal est de 4,11 mm et l'énergie absorbée est de 1,50 J. Un premier endommagement est observé à 733,83 N, suivi de plusieurs autres endommagements. Pour le composite contenant 30 % de fibres de bouleau, la force maximale est de 895,46 N, le déplacement maximal est de 3,72 mm et l'énergie absorbée est de 1,47 J. Le premier endommagement est observé à 759,01 N, suivi de plusieurs autres endommagements. Les résultats montrent également que le composite contenant 10 % de fibres de kraft présente une force maximale de 1030,47 N, un déplacement maximal de 3,6 mm et une énergie absorbée de 1,27 J. Pour le composite contenant 20 % de fibres de kraft, la force maximale est de 1027,30 N, le déplacement maximal est de 3,68 mm et l'énergie absorbée est de 1,36 J. Le premier endommagement est égal à la force maximale de 1027,30 N.

Tableau 4.2 Propriétés mécaniques à l'impact des composites de bouleau et de kraft avant vieillissement

Bouleau	UV Temps (h)	Premier Endommagement	Force maximale (N)	Displacement maximal (mm)	L'énergie absorbée (J)	Endommagement (λ, %)
10 %	0	-	1013,52	3,60	1,47	0,73
20 %	0	733,83	921,90	4,11	1,5	0,75
30 %	0	759,01	895,46	3,72	1,47	0,73
Kraft	UV Temps (h)	Premier Endommagement	Force maximale (N)	Displacement maximal (mm)	L'énergie absorbée (J)	Endommagement (λ, %)
10 %	0	-	1030,47	3,60	1,27	0,63
20 %	0	1027,30	1027,30	3,68	1,36	0,68
30 %	0	1042,88	1042,88	3,23	1,32	0,66

Pour le composite contenant 30 % de fibres de kraft, la force maximale est de 1042 N, le déplacement maximal est de 3,23 mm et l'énergie absorbée est de 1,32 J. Le premier endommagement est également égal à la force maximale de 1042 N.

Les résultats indiquent que la résistance mécanique des composites à base de fibres de bouleau est légèrement inférieure à celle des composites à base de fibres de kraft. Toutefois, les composites à base de fibres de bouleau absorbent plus d'énergie pendant la phase d'absorption de l'impact. Les différents pourcentages de fibres dans les composites ont également un impact significatif sur leur résistance mécanique et leur capacité à absorber l'énergie.

4.7 Les résultats de traction après le vieillissement

Les résultats présentés dans les figures 4.11, 4.12, 4.13 et le tableau 4.3 fournissent des informations détaillées sur les effets de l'exposition aux rayons UV sur les propriétés mécaniques en traction des composites à base de fibres de bouleau et de kraft. Ces données permettent de comprendre les variations observées dans le module d'élasticité, la résistance à la rupture en traction et la déformation à la rupture pour les échantillons vieillis par rapport à ceux non vieillis.

En analysant le module d'élasticité, on constate une diminution générale de 5 % à 18 % pour les composites à base de fibres de kraft. Cela indique que ces composites perdent de leur rigidité après une exposition prolongée aux rayons UV.

En revanche, les composites à base de fibres de bouleau montrent une diminution maximale de 12 % pour un contenu en fibres de 30 %. Cette différence peut s'expliquer par les caractéristiques intrinsèques des deux types de fibres. Il est important de noter que plus le pourcentage de fibres est élevé, plus la diminution du module d'élasticité est significative pour les deux types de composites.

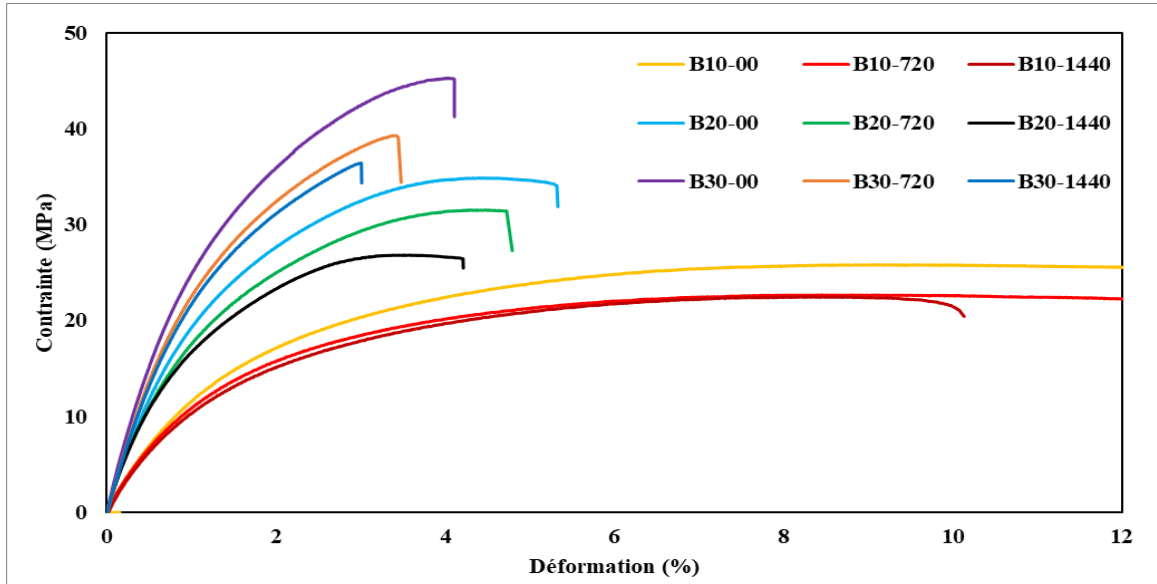


Figure 4.36 Courbes contrainte-déformation des composites à base de fibre de bouleau en fonction du taux de fibre de bouleau (échantillons sains et vieillis jusqu'à 1440 h)

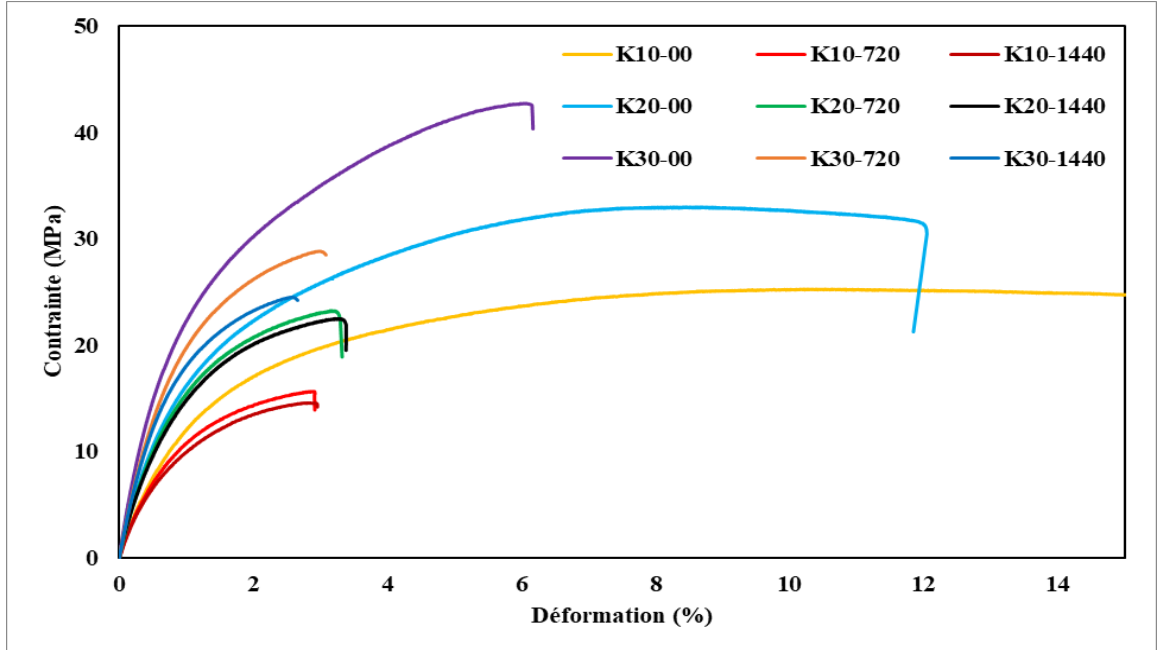


Figure 4.37 Courbes contrainte-déformation des composites à base de fibre de kraft en fonction du taux de fibre de bouleau (échantillons sains et vieillis jusqu'à 1440 h)

En ce qui concerne la déformation à la rupture, les composites à base de fibres de kraft présentent une diminution très importante, en particulier lorsque le pourcentage de fibres diminue. Cela signifie que ces composites sont plus sensibles aux effets néfastes des rayons UV, ce qui conduit à une réduction significative de leur capacité à se déformer avant de se rompre. D'autre part, les composites à base de fibres de bouleau présentent une diminution similaire de la déformation à la rupture pour des contenus en fibres de 20 % et 30 %. Cela suggère que la composition du matériau a une influence moins marquée sur cette propriété par rapport au module d'élasticité.

En ce qui concerne la résistance à la rupture en traction, on observe une tendance similaire à celle du module d'élasticité et de la déformation à la rupture. Les composites à base de fibres de kraft subissent une diminution importante de leur capacité à résister à la rupture, en particulier lorsque le pourcentage de fibres diminue. Les composites à base de fibres de bouleau montrent également une diminution de cette propriété, mais elle est généralement moins prononcée que pour les composites à base de kraft.

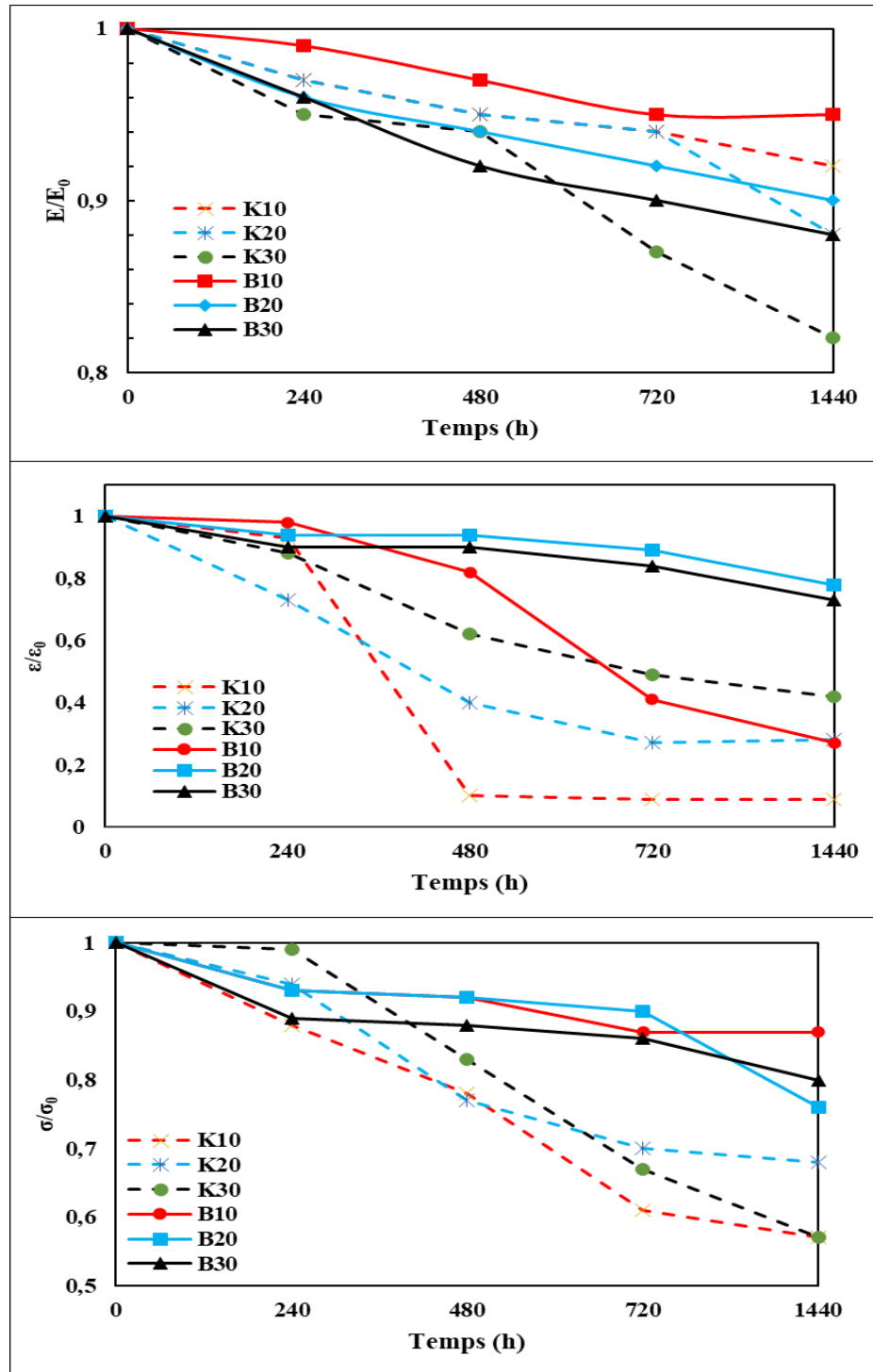


Figure 4.38 L'évolution des propriétés en traction des composites sains et jusqu'à 1440 heures du vieillissement

Tableau 4. 3 L'évolution propriétés en traction des composites avant et après 1440 heures du vieillissement

UV (B10)	E(Gpa)	E/E0	ϵ	ϵ/ϵ_0	σ	σ/σ_0
0	1,41	1	36,66	1	25,83	1
240	1,4	0,99	36,14	0,98	24,11	0,93
480	1,38	0,97	30,32	0,82	24	0,92
720	1,35	0,95	15,15	0,41	22,7	0,87
1440	1,34	0,95	10,13	0,27	22,48	0,87

UV (K10)	E(Gpa)	E/E0	ϵ	ϵ/ϵ_0	σ	σ/σ_0
0	1,51	1	31,39	1	25,26	1
240	1,47	0,97	29,44	0,93	22,26	0,88
480	1,44	0,95	3,37	0,1	19,81	0,78
720	1,42	0,94	2,91	0,09	15,62	0,61
1440	1,39	0,92	2,95	0,09	14,56	0,57

UV (B20)	E(Gpa)	E/E0	ϵ	ϵ/ϵ_0	σ	σ/σ_0
0	2,41	1	5,33	1	34,88	1
240	2,33	0,96	5,02	0,94	32,77	0,93
480	2,28	0,94	5,03	0,94	32,33	0,92
720	2,23	0,92	4,79	0,89	31,55	0,9
1440	2,19	0,9	4,21	0,78	26,84	0,76

UV (K20)	E(Gpa)	E/E0	ϵ	ϵ/ϵ_0	σ	σ/σ_0
0	2,14	1	12,04	1	32,99	1
240	2,09	0,97	8,79	0,73	31,2	0,94
480	2,05	0,95	4,92	0,4	25,72	0,77
720	1,03	0,94	3,32	0,27	23,23	0,7
1440	1,9	0,88	3,38	0,28	22,49	0,68

UV (B30)	E(Gpa)	E/E0	ϵ	ϵ/ϵ_0	σ	σ/σ_0
0	3,08	1	4,1	1	45,32	1
240	2,97	0,96	3,71	0,9	40,55	0,89
480	2,84	0,92	3,72	0,9	40,23	0,88
720	2,79	0,9	3,47	0,84	39,29	0,86
1440	2,73	0,88	3,01	0,73	36,44	0,8

UV (K30)	E(Gpa)	E/E0	ϵ	ϵ/ϵ_0	σ	σ/σ_0
0	3,05	1	6,17	1	42,73	1
240	2,92	0,95	5,46	0,88	42,36	0,99
480	2,88	0,94	3,87	0,62	35,47	0,83
720	2,67	0,87	3,08	0,49	28,82	0,67
1440	2,52	0,82	2,65	0,42	24,5	0,57

Il est important de souligner que la perte des propriétés mécaniques est plus significative dans les composites à base de fibres de kraft en raison de l'absence de lignine. La lignine joue un rôle essentiel dans la protection des surfaces des composites en tant que retardateur de la photooxydation. Par conséquent, sa présence dans les composites à base de bouleau les rend plus résistants aux effets néfastes des rayons UV.

4.8 Les résultats d'impact après vieillissement

Les résultats présentés dans les figures 4.14, 4.15, 4.16 et le tableau 4.4 fournissent des informations détaillées des effets de l'exposition aux rayons UV sur les propriétés mécaniques l'impact des composites à base de fibres de bouleau et de kraft.

Les résultats d'impact montrent que la force maximale (F_{max}) diminue de manière similaire en pourcentage pour les deux composites.

Cependant, cette diminution est moins importante, environ 6 % en moyenne, lorsque le pourcentage de fibres est de 10 % pour les deux composites. En revanche, pour les composites contenant 20 % et 30 % de fibres, la diminution de la F_{max} est d'environ 16 %. Il est intéressant de noter qu'à 20 % de fibres de kraft, la chute est d'environ 20 %. En ce qui concerne le déplacement maximal, on a observé que le bouleau est moins affecté que le kraft, avec une augmentation du déplacement maximal pour le kraft à mesure que le temps de vieillissement augmente. Cela suggère que le bouleau conserve une meilleure résistance à l'impact et une capacité à absorber les contraintes malgré le vieillissement induit par les rayons UV. En revanche, le composite à base de fibres de kraft montre une augmentation du déplacement maximal à mesure que le temps de vieillissement augmente, ce qui indique une détérioration progressive de sa capacité à résister à des charges d'impact élevées.

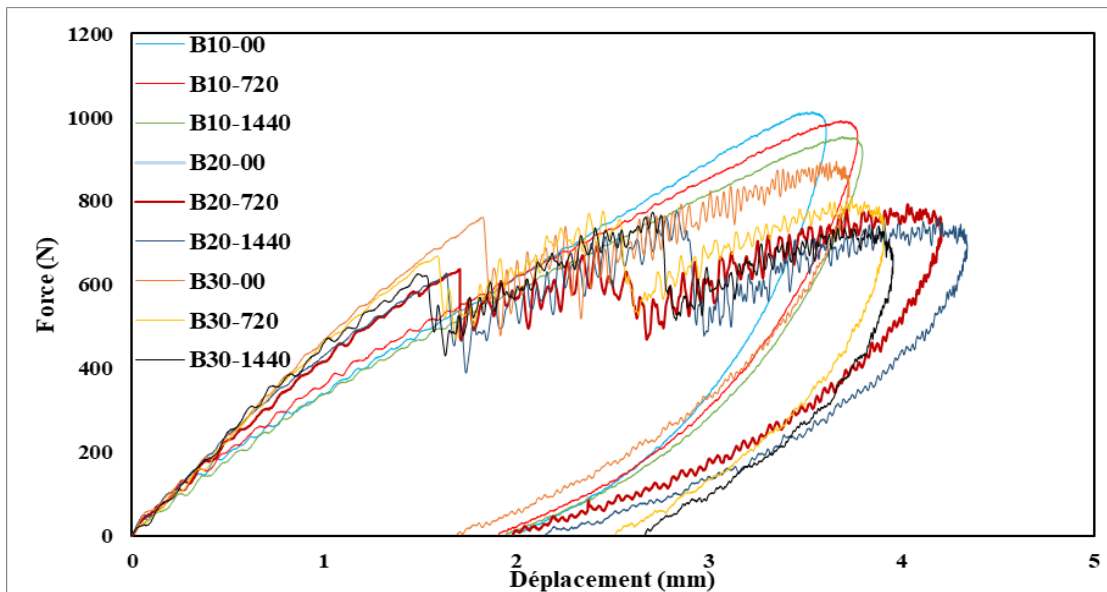


Figure 4.39 Courbes force-déplacement des composites à base de fibre de bouleau en fonction du taux de fibre de bouleau (échantillons sains et vieillis jusqu'à 1440 h)

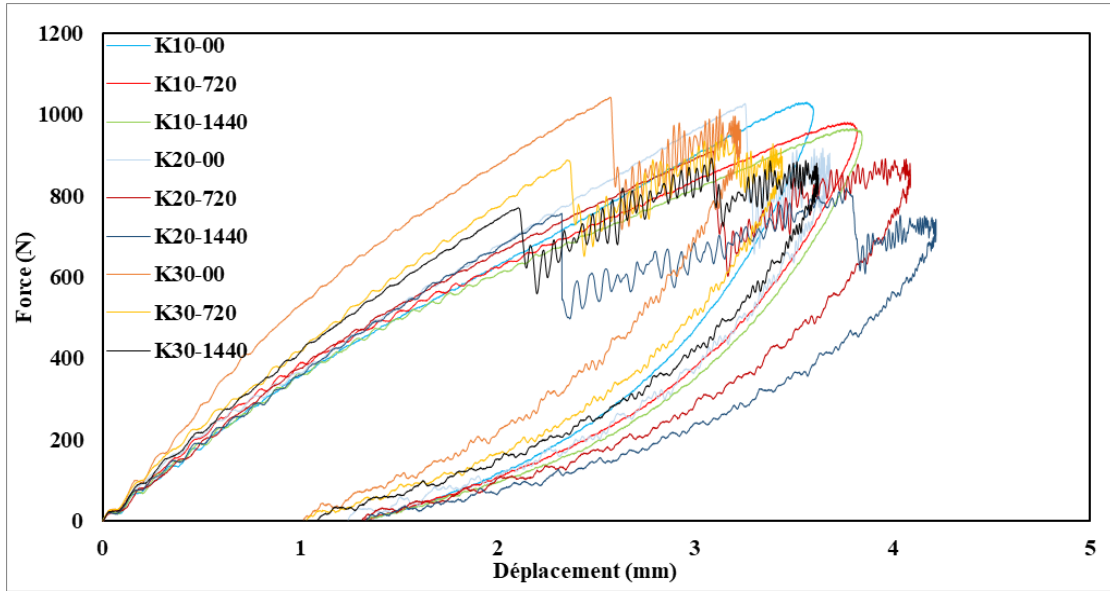


Figure 4.40 Courbes force-déplacement des composites à base de fibre de kraft en fonction du taux de fibre de bouleau (échantillons sains et vieillis jusqu'à 1440 h)

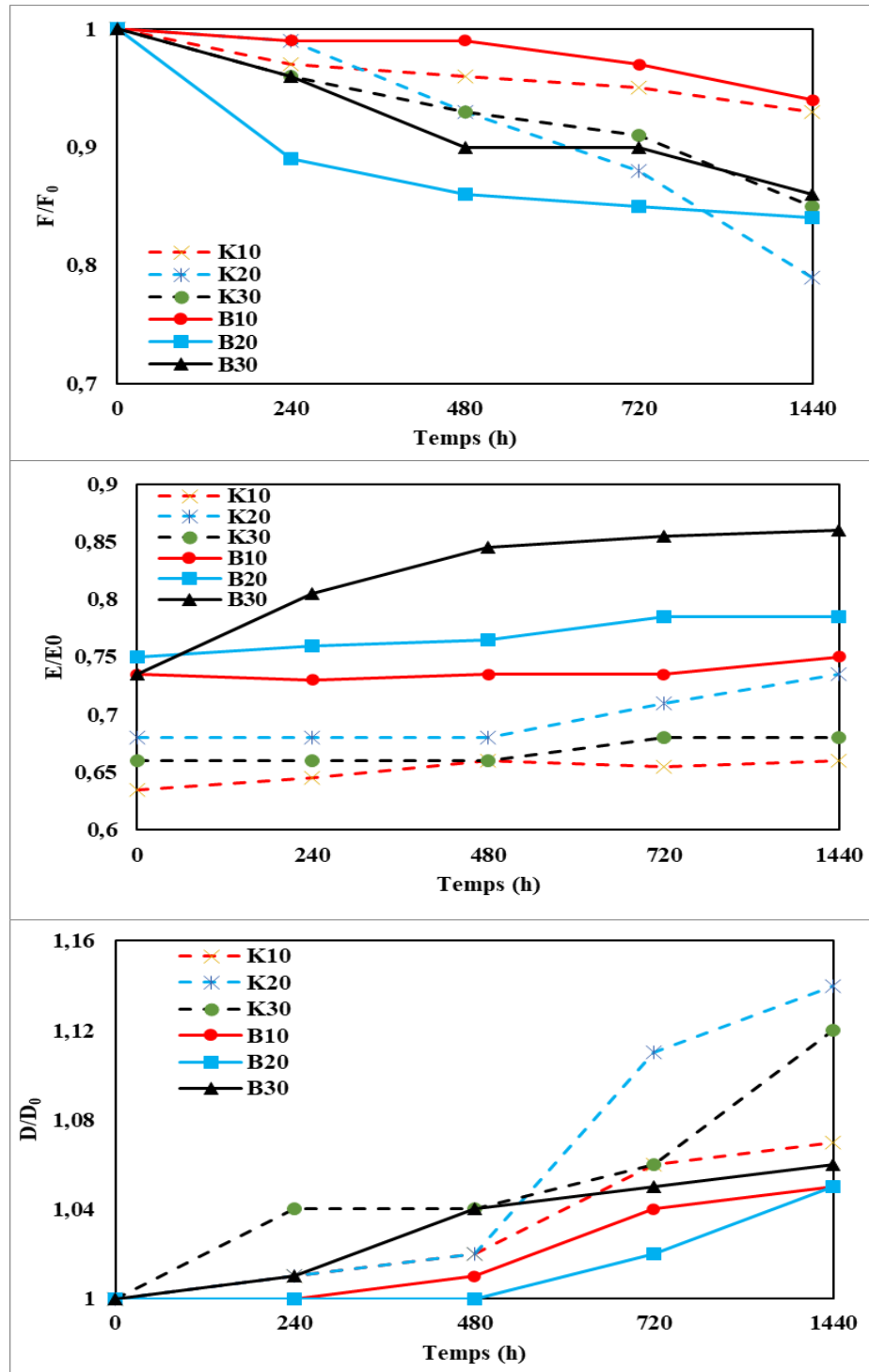


Figure 4.41 L'évolution propriétés d'impact des composites saines et jusqu'à 1440 heures du vieillissement

Tableau 4.4 L'évolution propriétés d'impact des composites saines et jusqu' à 1440 heures du vieillissement

UV B10	F(N)	F/F ₀	D	D/D ₀	E	E/E ₀
0	1013,52	1	3,6	1	1,47	0,735
240	1003,64	0,99	3,59	1	1,46	0,73
480	1004,8	0,99	3,65	1,01	1,47	0,735
720	992,97	0,97	3,77	1,04	1,47	0,735
1440	954,56	0,94	3,79	1,05	1,5	0,75
UV B20	F(N)	F/F ₀	D	D/D ₀	E	E/E ₀
0	921,9	1	4,11	1	1,5	0,75
240	823,92	0,89	4,11	1	1,52	0,76
480	794,2	0,86	4,09	1	1,53	0,765
720	792,76	0,85	4,2	1,02	1,57	0,785
1440	776,36	0,84	4,34	1,05	1,57	0,785
UV B30	F(N)	F/F ₀	D	D/D ₀	E	E/E ₀
0	895,46	1	3,72	1	1,47	0,735
240	863,15	0,96	3,78	1,01	1,61	0,805
480	807,18	0,9	3,87	1,04	1,69	0,845
720	810,65	0,9	3,91	1,05	1,71	0,855
1440	774,16	0,86	3,95	1,06	1,72	0,86
UV K10	F(N)	F/F ₀	D	D/D ₀	E	E/E ₀
0	1030,47	1	3,6	1	1,27	0,635
240	1002,55	0,97	3,65	1,01	1,29	0,645
480	995,36	0,96	3,7	1,02	1,32	0,66
720	980,56	0,95	3,82	1,06	1,31	0,655
1440	965,56	0,93	3,84	1,07	1,32	0,66
UV K20	F(N)	F/F ₀	D	D/D ₀	E	E/E ₀
0	1027,3	1	3,68	1	1,36	0,68
240	1024,7	0,99	3,73	1,01	1,36	0,68
480	956,91	0,93	3,76	1,02	1,36	0,68
720	910,75	0,88	4,09	1,11	1,42	0,71
1440	819,35	0,79	4,22	1,14	1,47	0,735
UV K30	F(N)	F/F ₀	D	D/D ₀	E	E/E ₀
0	1042,88	1	3,23	1	1,32	0,66
240	1007,39	0,96	3,36	1,04	1,32	0,66
480	972,37	0,93	3,38	1,04	1,32	0,66
720	951,54	0,91	3,44	1,06	1,36	0,68
1440	892,63	0,85	3,62	1,12	1,36	0,68

Ces résultats soulignent l'effet du pourcentage de fibres et du temps de vieillissement sur les propriétés d'impact des composites à base de fibres de bouleau et de kraft. Les composites avec un pourcentage de fibres plus élevé et un vieillissement plus long montrent une plus grande diminution de la résistance à l'impact et du déplacement maximal. Le bouleau semble être plus résistant à l'impact et moins sensible au vieillissement par rapport au kraft.

Conclusion générale

Dans le cadre de notre étude expérimentale, on s'est concentrés sur l'évaluation du comportement à l'impact et en traction des composites fabriqués à partir de fibres de bouleau et de fibres de kraft. Notre travail a été conçu pour atteindre plusieurs objectifs spécifiques et a été organisé en plusieurs étapes clés. L'une des premières étapes a consisté en une recherche bibliographique approfondie sur les propriétés mécaniques des fibres naturelles, afin de mieux comprendre leurs caractéristiques.

Pour évaluer les changements visuels induits par le vieillissement UV, on a réalisé des tests de couleurs sur les surfaces des composites. Ces tests nous ont permis de mesurer et de quantifier les altérations de teinte et d'apparence des matériaux après l'exposition aux rayons UV. De plus, nous avons effectué des mesures de rugosité pour évaluer les modifications de texture et d'aspect des surfaces des composites. Ces mesures nous ont fourni des indications sur l'évolution de la rugosité et de la qualité de surface des matériaux à la suite du vieillissement. On a également utilisé la microscopie électronique à balayage (MEB) pour examiner en détail la structure des composites. Les images MEB ont été prises afin d'analyser la présence éventuelle de fissures dans les matériaux et d'étudier leur distribution et leur gravité.

Les résultats expérimentaux ont démontré de manière significative l'impact du vieillissement UV sur les propriétés visuelles et structurelles des composites à base de fibre de bouleau et de fibre de kraft. Les tests de couleur et les mesures de rugosité ont révélé des altérations visibles, ainsi qu'une augmentation de la rugosité des composites à base de fibre de kraft après le vieillissement UV, cette augmentation étant plus importante que celle observée pour les composites à base de fibre de bouleau. De plus, les images obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) ont confirmé une plus grande propension des composites à base de fibre de kraft à présenter des fissures par rapport aux composites à base de fibre de bouleau. Les résultats des essais de traction ont révélé une

diminution significative des performances des composites à base de fibre de kraft, en particulier en termes de déformation à la rupture.

Les résultats des essais d'impact à basse vitesse ont également démontré une chute plus importante du déplacement maximal pour les composites à base de fibre de kraft. Ces observations peuvent être expliquées par la présence de la lignine dans les fibres de bouleau. En effet, la lignine joue un rôle très important en tant que retardateur de la photo-oxydation, ce qui contribue à améliorer la résistance au vieillissement des composites à base de fibre de bouleau. Cependant, les composites à base de fibre de kraft, qui ne contiennent pas de lignine, sont plus vulnérables aux effets néfastes du vieillissement UV, ce qui se traduit par une augmentation de la rugosité, des fissures et une diminution des performances mécaniques.

Recommandations et perspectives

Les résultats de notre étude expérimentale mettent en évidence l'importance de prendre en compte l'impact du vieillissement UV sur les propriétés visuelles et structurelles des composites à base de fibres de bouleau et de fibres de kraft. Ces résultats ouvrent la voie à plusieurs perspectives intéressantes pour des recherches futures :

Optimisation de la composition des composites : En utilisant nos connaissances sur les propriétés de la lignine et son rôle de retardateur de la photo-oxydation, il serait possible d'explorer différentes méthodes pour renforcer la présence de lignine dans les composites à base de fibre de kraft. Cela pourrait inclure des techniques de traitement chimique ou l'utilisation de résines modifiées contenant de la lignine, afin d'améliorer leur résistance au vieillissement UV.

Développement d'additifs protecteurs : Des recherches supplémentaires pourraient être entreprises pour identifier et développer des additifs spécifiques qui offrent une protection accrue contre les effets néfastes du vieillissement UV. Ces additifs pourraient être intégrés dans la matrice polymère ou utilisés comme revêtements de surface pour améliorer la résistance aux UV des composites à base de fibre de kraft.

Caractérisation avancée des mécanismes de dégradation : Une compréhension plus approfondie des mécanismes de dégradation induite par les UV dans les composites à base de fibre de bouleau et de fibre de kraft pourrait être réalisée en utilisant des techniques d'analyse avancées telles que la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et la spectroscopie Raman. Cela permettrait d'identifier les modifications chimiques spécifiques qui se produisent dans les matériaux et de mieux comprendre les processus de dégradation.

Étude de l'effet de différents paramètres environnementaux : Outre le vieillissement UV, il serait intéressant d'étudier l'impact d'autres facteurs environnementaux tels que l'humidité, la chaleur et les agents chimiques sur les propriétés des composites à base de fibres de bouleau et de fibres de kraft. Cela fournirait des informations supplémentaires sur la durabilité globale de ces matériaux et permettrait d'optimiser leur performance dans différentes conditions d'utilisation.

RÉFÉRENCES

- [1] Xianhui Zhao et Al. Recycling of natural fiber composites: Challenges and opportunities. February 2022
- [2] Siti Hasnah Kamarudin et Al A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. September 2022
- [3] Ljerka Kratofil Krehula, Zvonimir Katančić, Anita Ptiček Siročić & Zlata Hrnjak-Murgić Weathering of High-Density Polyethylene-Wood Plastic Composites Journal of Wood Chemistry and Technology 2013.
- [4] Seldén R. Nyström, B. Långström, R. UV aging of poly(propylene)/wood-fiber composites
- [5] https://marketpublishers.com/report/life_sciences/healthcare/global-natural-fiber-composites-market-analysis-2013-2018-n-forecast-2019-2024.html Purchase site for a Lucintel strategic market report on natural fiber composites. Accessed 30 April 2021
- [6] Béatrice George a, Ed Suttie b, André Merlin a, Xavier Deglise a Photodegradation and photostabilisation of wood – the state of the art.
- [7] Suits L.D., Hsuan Y.G. Assessing the photo-degradation of geosynthetics by outdoor exposure and laboratory weatherometer. Geotext. Geomembr. 2003
- [8] Yousif E., Haddad R. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: Review. SpringerPlus. 2013
- [9] U. K. Vaidya* and K. K. Chawla Processing of fibre reinforced thermoplastic composites. Jul 2013
- [10] A. K. BLEDZKI, S. REIHMANE & J. GASSAN, THERMOPLASTICS REINFORCED WITH WOOD FILLERS: A LITERATURE REVIEW
- [11] James Holbery & Dan Houston Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications JOM volume 58, pages80–86 (2006)

- [12] F. Gouanve, S. Marais, A. Bessadok, D. Langevin, and M. Metayer, "Kinetics of water sorption in flax and PET fibers," *European Polymer Journal*, vol. 43, no. 2, pp. 586-598, Feb 2007. [58] J. Z. Lu, Q. Wu, and H. S. McNabb, "Chemical co
- [13] V. V. Do Thi, "Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non," Université de Grenoble, 2011.
- [14] Xulin Yang, Zicheng Wang, Mingzhen Xu, Rui Zhao, Xiaobo Liu Dramatic mechanical and thermal increments of thermoplastic composites by multi-scale synergetic reinforcement: Carbon fiber and graphene nanoplatelet.
- [15] Afonso R. G. de Azevedo Natural Fibers as an Alternative to Synthetic Fibers in Reinforcement of Geopolymer Matrices: A Comparative Review July 2021.
- [16] Stokke, O.O., WU, Q., Han, G. (2013). Introduction to Wood and Natural Fiber Composites, (p. 5-13). John Wiley & Son. United Kingdom.
- [17] T. Gurunathan, Smita Mohanty, Sanjay K. Nayak; A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives; *Composites: Part A* 77 (2015) 1–25.
- [18] D. C. Nguyen, "Caractérisation de l'interface fibre/matrice: application aux composites polypropylène/chanvre," Troyes, 2016.
- [19] P. Wambua. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology* 63 (2003) 1259–1264.
- [20] T. Kunanopparat, P. Menut, M.-H. Morel, S. Guilbert. Reinforcement of plasticized wheat gluten with natural fibers: From mechanical improvement to deplasticizing effect May 2008.
- [21] B. Clair. Thèse : Étude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire : essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxal du bois de tension à couche gélatineuse. École du génie rural, des Eaux et Forêts, Centre de Montpellier. 2001.

- [22] Rencurosi, A.; Röhring, J.; Pauli, J.; Potthast, A.; Jäger, C.; Pérez, S.; Kosma, P.; Imberty, A. Polymorphism in the Crystal Structure of the Cellulose Fragment Analogue Methyl 4-O-Methyl- β -D-Glucopyranosyl-(1-4)- β -D-Glucopyranoside. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2002, 41, 4277–4281
- [23] Chenyuan Zhang, Jilong Mo, Qiu Fu, Yanhua Liu, Shuangfei Wang, Shuangxi Nie Wood-cellulose-fiber-based functional materials for triboelectric nanogenerators March 2021.
- [24] Henriksson, G., Gellerstedt, G. et Ek, M. *Wood Chemistry and Wood Biotechnology*. Berlin: Walter De Gruyter. 308 p. (2009).
- [25] Z.N. Azwa, B.F. Yousif, A.C. Manalo, W. Karunasena, A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres, *Mater. Des.* 47 (2013) 424–442.
- [26] [10] Hector Enrique Gonzales Mora. Thèse : Étude des effets de la force de cisaillement au cours du raffinage PFI sur les propriétés d'une pâte à haut rendement de pin gris. Université du Québec à Trois-Rivières. 2002.
- [27] Elchingen, P.-H. Réticulation de fibres lignocellulosiques et d'amidon: vers de nouveaux matériaux pour l'industrie papetière, Thèse, Université du Québec à Trois-Rivières-Université de Limoge, pp 162. (2013).
- [28] M. A. Azman et Al Natural Fiber Reinforced Composite Material for Product Design: A Short Review June 2021.
- [29] Franck Michaud. Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécaniques. Université de Bordeaux I, Bordeaux (France), 2003.235
- [30] James Eduardo Lago Londero, Maurício Beux dos Santos, André Passaglia Schuch Impact of solar UV radiation on amphibians: focus on genotoxic stress June 2019
- [31] Rabek J.F. *Polymer Photodegradation Mechanisms and Experimental Methods*. Chapman & Hall; London, UK: 1995.

- [32] 16. Massey L.K. The Effects of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers. 2nd ed. William Andrew; Norwich, NY, USA: 2007
- [33] Saeid Nikafshar et Al. The Effects of UV Light on the Chemical and Mechanical Properties of a Transparent Epoxy-Diamine System in the Presence of an Organic UV Absorber.
- [34] M. Kiguchi, Y. Kataoka, H. Matsunaga, K. Yamamoto, P.D. Evans, Surface deterioration of wood-flour polypropylene composites by weathering trials, *J. Wood Sci.* 53 (2006) 234–238.
- [35] Y. Peng, R. Liu, J. Cao, Y. Chen, Effects of UV weathering on surface properties of polypropylene composites reinforced with wood flour, lignin, and cellulose, *Appl. Surf. Sci.* 317 (2014) 385–392.
- [36] H. Sadeghifar, A. Ragauskas Lignin as a UV Light blocker-a review *Polymers*, 12 (2020),
- [37] Effects of UV weathering on surface properties of polypropylene composites reinforced with wood flour, lignin, and cellulose. (2014)
- [38] N.M. Stark, L.M. Matuana, C.M. Clemons. Effect of processing method on surface and weathering characteristics of wood-flour/HDPE composites (2004)
- [39] M.D.H. Beg, K.L. Pickering Accelerated weathering of unbleached and bleached Kraft wood fibre reinforced polypropylene composites (2008)
- [40] Rangaraj, S.V.; Smith, L.V. Effects of moisture on the durability of a wood/thermoplastic composite. *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 2000,
- [41] Wei, L.; McDonald, A.G.; Freitag, C.; Morrell, J.J. Effects of wood fiber esterification on properties, weatherability and biodurability of wood plastic composites. *Polym. Degrad. Stab.* 2013

- [42] RALUCA NICOLETA DARIE and al. Evaluation of properties of LDPE/oak wood composites exposed to artificial ageing. *Cellulose Chem. Technol* (2011).
- [43] V. Shim and L. Yang. Characterization of the residual mechanical properties of woven fabric reinforced composites after low-velocity impact. *International Journal of Mechanical Sciences* 2005.
- [44] ASTM D7136: Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event.
- [45] Harshad Pingulkar, Ashok Mache, Yashwant Munde, I. Siva. A comprehensive review on drop weight impact characteristics of bast natural fiber reinforced polymer composites February 2021.
- [46] Joseph Marae-Djouda Caractérisation optique des déformations à l'échelle nanométrique april 2016.
- [47] Akshay R. Mankar, Ashish Pandey, K.K. Pant Microwave-assisted extraction of lignin from coconut coir using deep eutectic solvents and its valorization to aromatics February 2022.

ANNEXES

Annexe A Images de la face arrière des échantillons impactés.

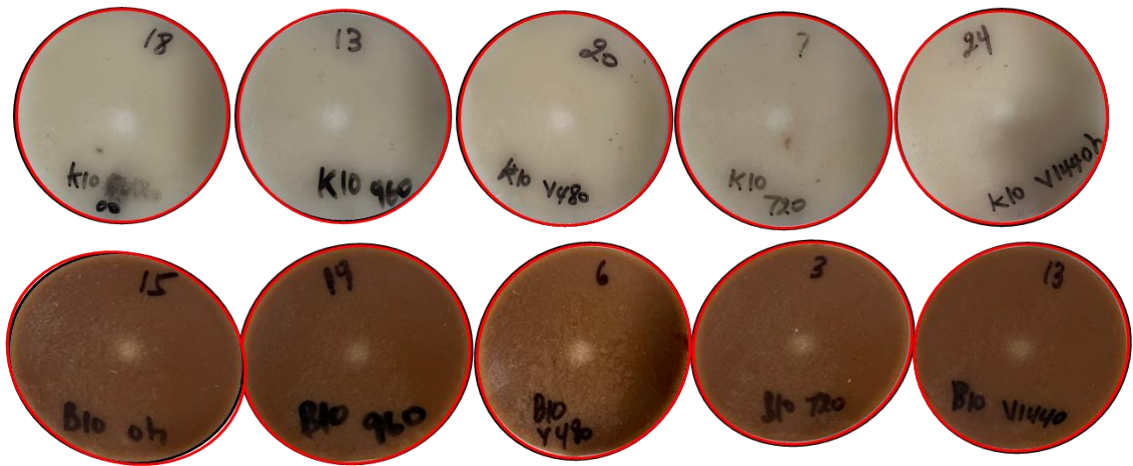


Figure A.42 L'évolution de l'endommagement sur la face arrière des échantillons impactés pour les éprouvettes qui contiennent 10 % des fibres à différents prélèvements (de 0 à 1440 heures)



Figure A.43 L'évolution de l'endommagement sur la face arrière des échantillons impactés pour les éprouvettes qui contiennent 20 % des fibres à différents prélèvements (de 0 à 1440 heures)

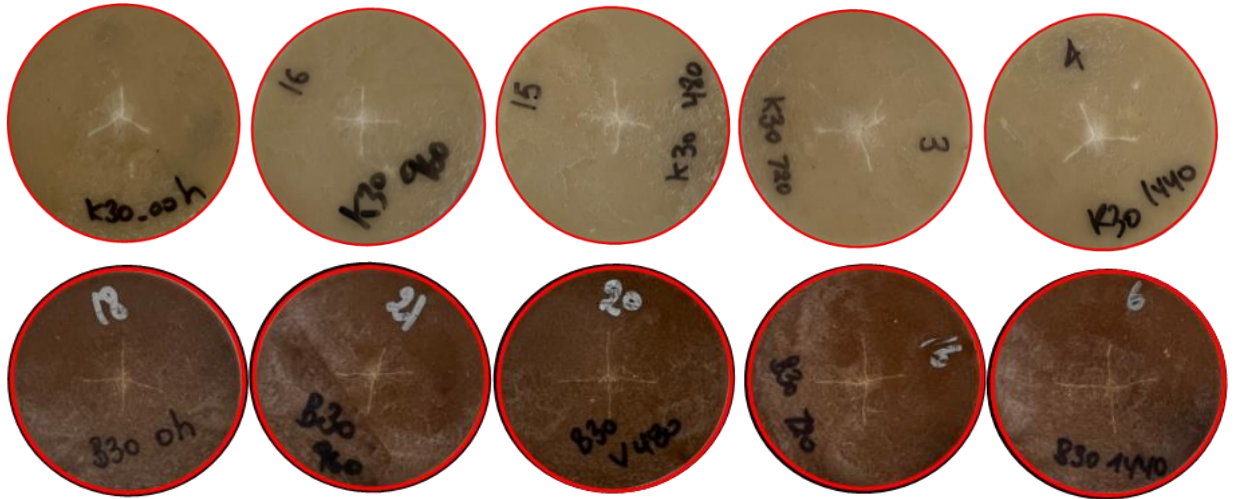


Figure A.44 L'évolution de l'endommagement sur la face arrière des échantillons impactés pour les éprouvettes qui contiennent 30 % des fibres à différents prélèvements (de 0 à 1440 heures)

Annexe B Taille des fissures après impact

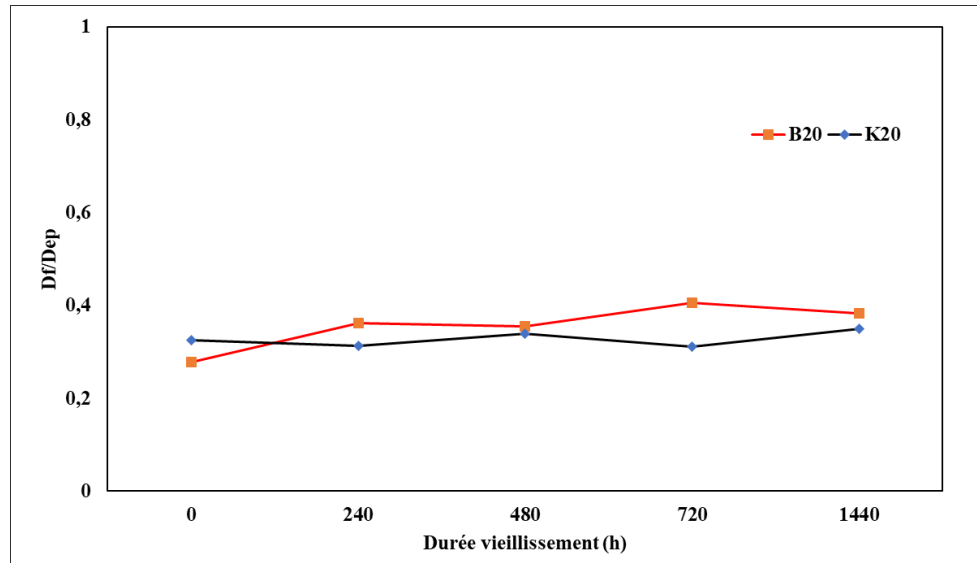


Figure B.45 L'évolution de la taille des fissures en fonction du temps de vieillissement pour les composites qui contiennent 20 % des fibres

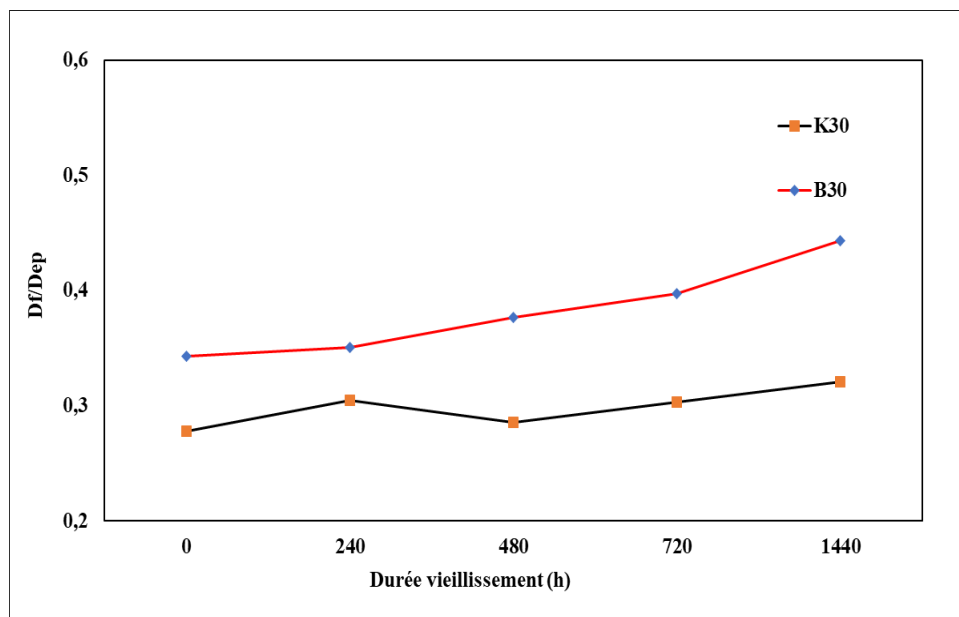


Figure B.46 L'évolution de la taille des fissures en fonction du temps de vieillissement pour les composites qui contiennent 30 % des fibres

Annexe C Traction avec émission acoustique

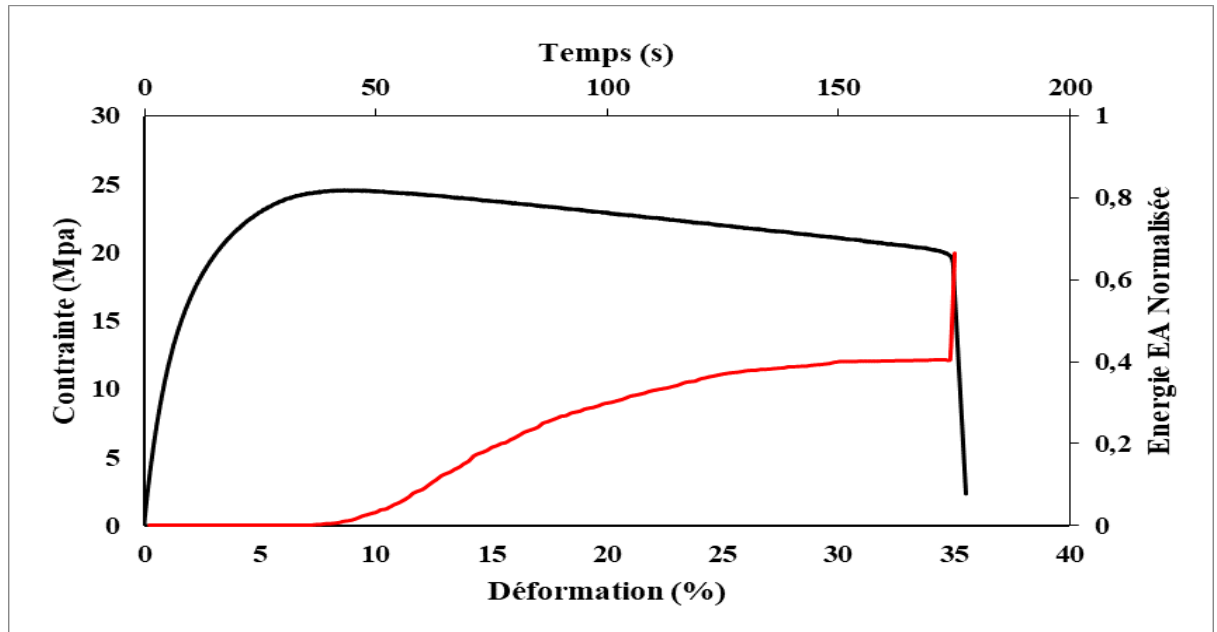


Figure C.47 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 10 % de fibre de bouleau avant vieillissement

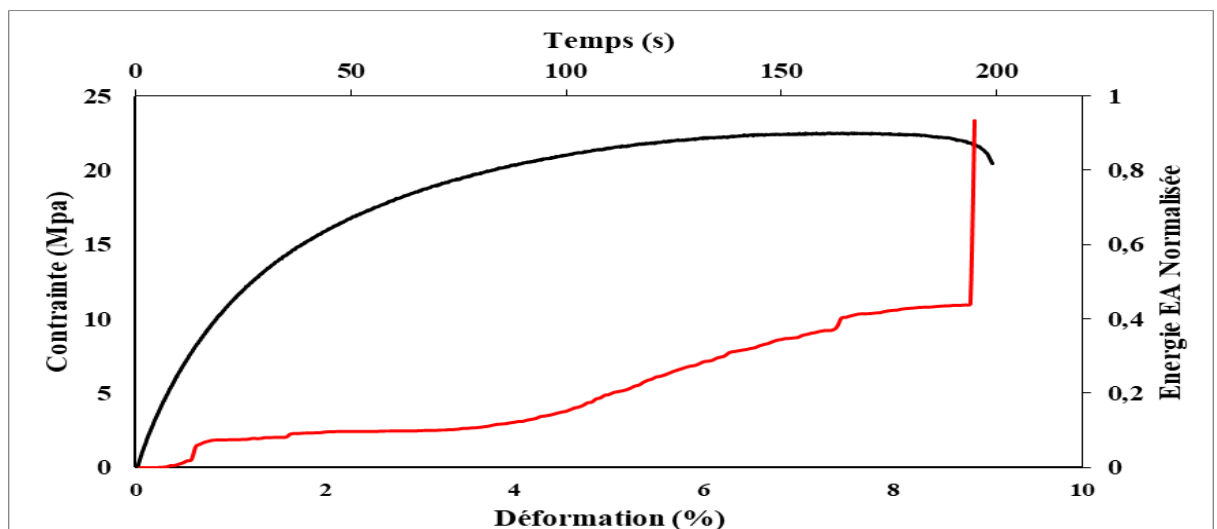


Figure C.48 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 10 % de fibre de bouleau après 1440 heures de vieillissement

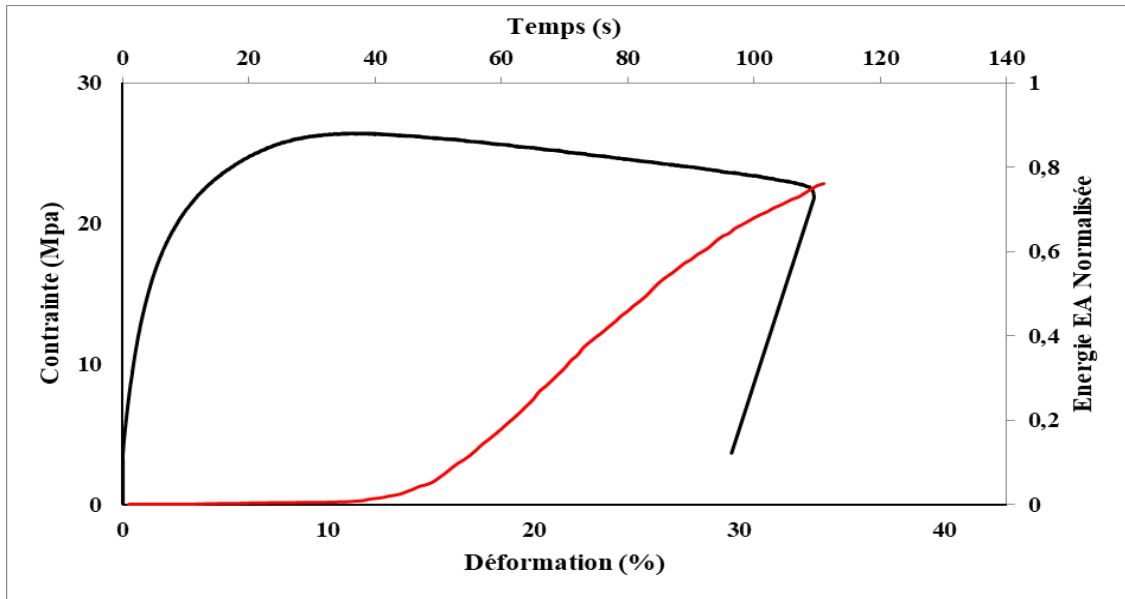


Figure C.49 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 10 % de fibre de kraft avant vieillissement

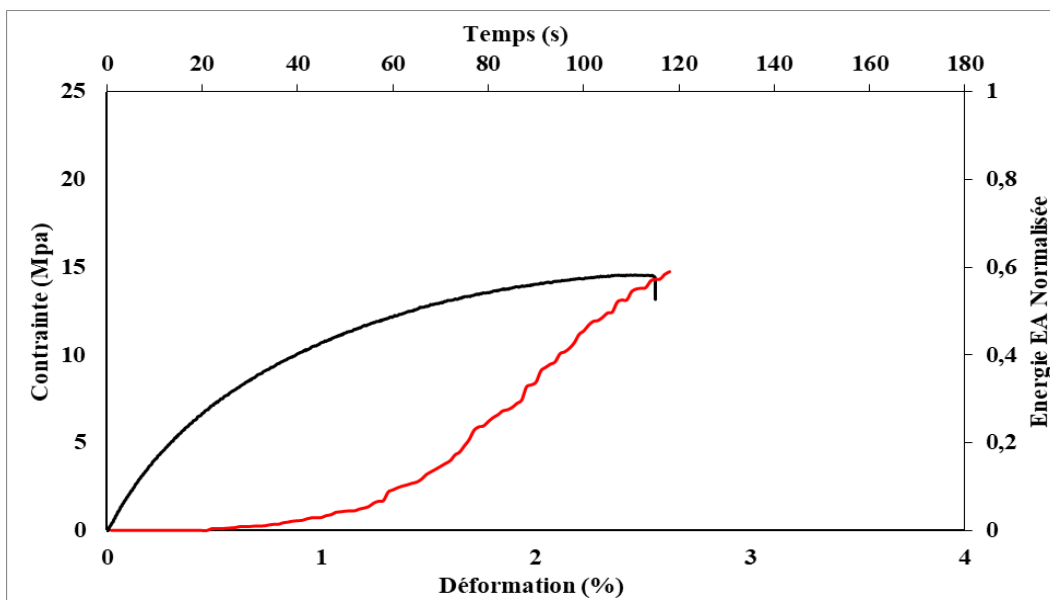


Figure C.50 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 10 % de fibre de kraft après 1440 heures de vieillissement

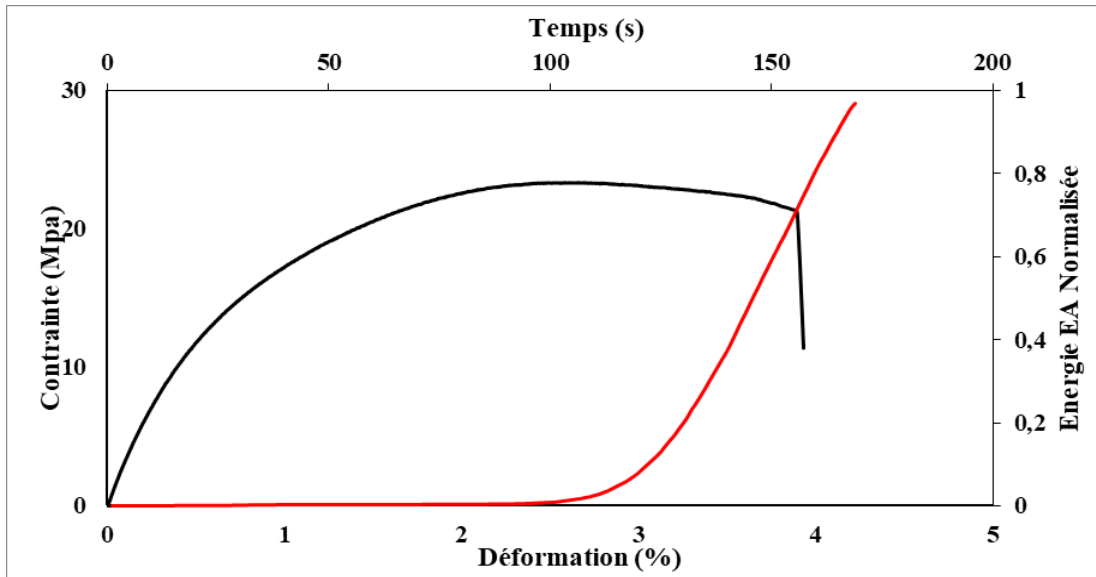


Figure C.52 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 20 % de fibre de bouleau avant vieillissement

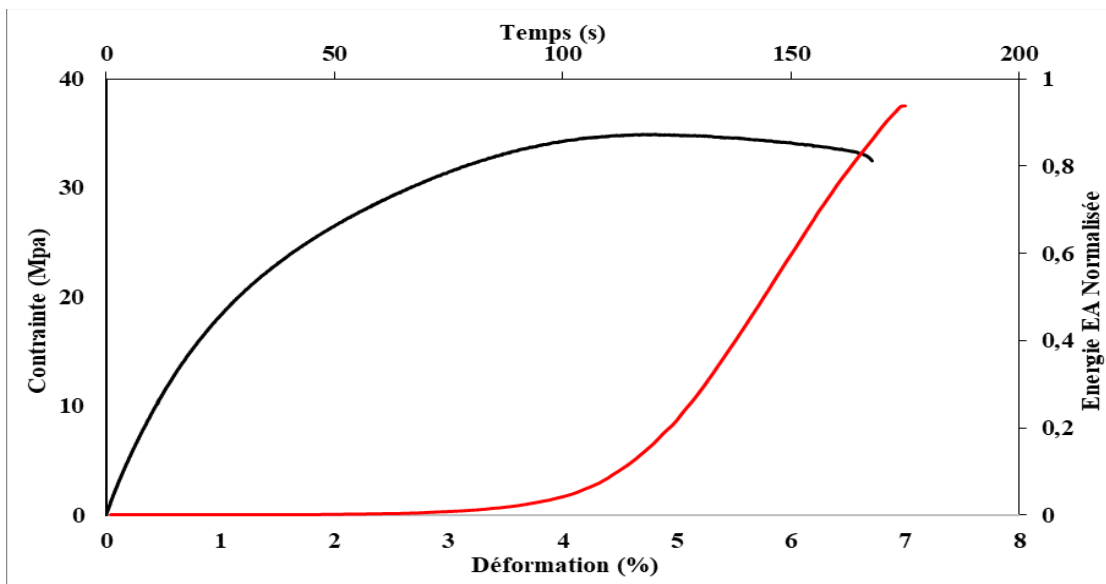


Figure C.51 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 20 % de fibre de bouleau après 1440 heures de vieillissement

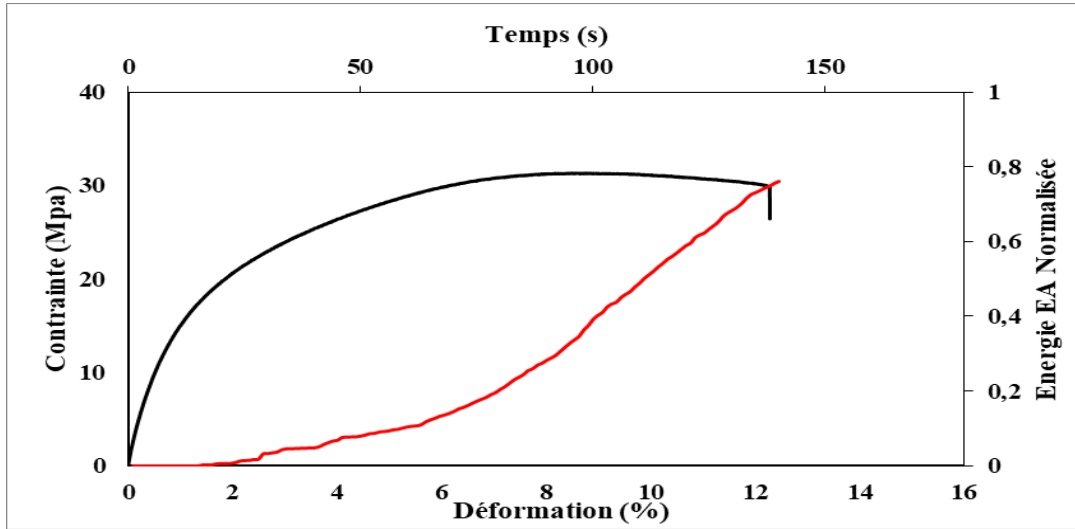


Figure C.53 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 20 % de fibre de kraft avant vieillissement

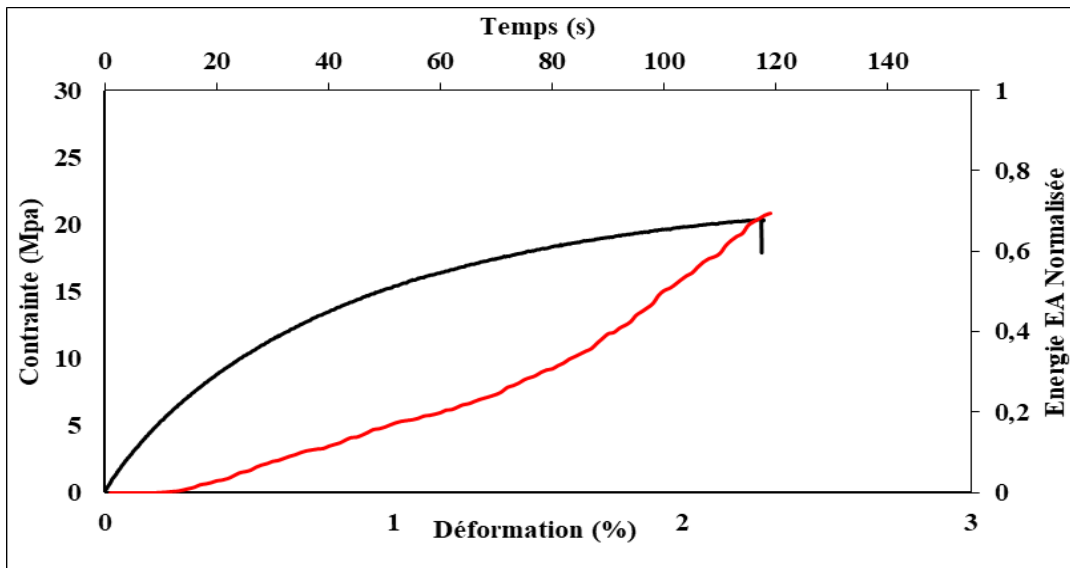


Figure C.54 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 20 % de fibre de kraft après 1440 heures de vieillissement

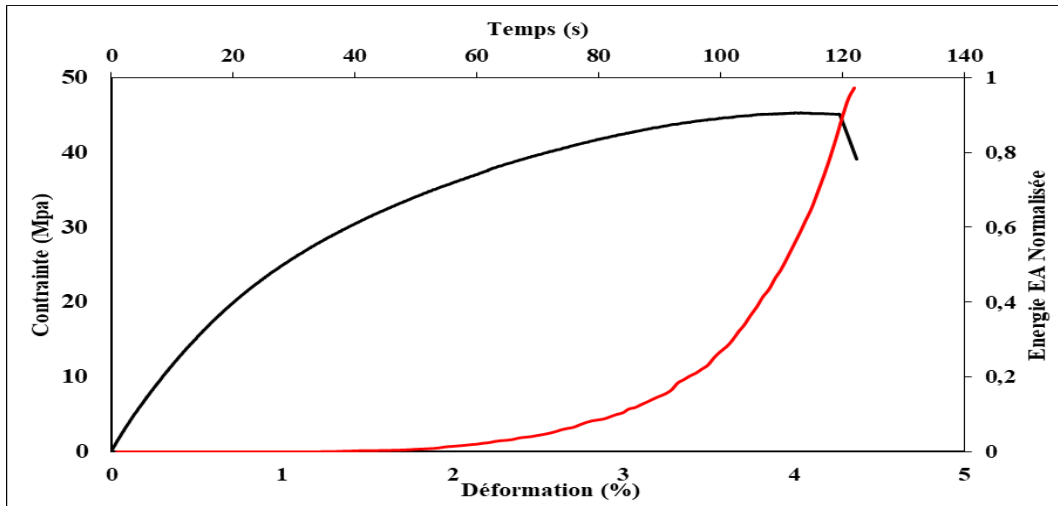


Figure C.55 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 30 % de fibre de bouleau avant vieillissement

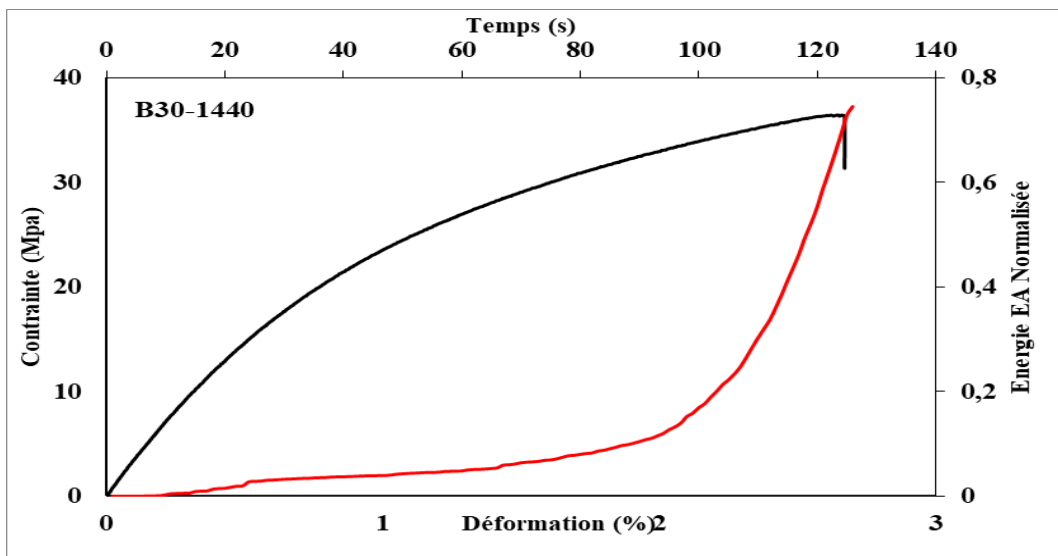


Figure C.56 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 30 % de fibre de bouleau après 1440 heures de vieillissement

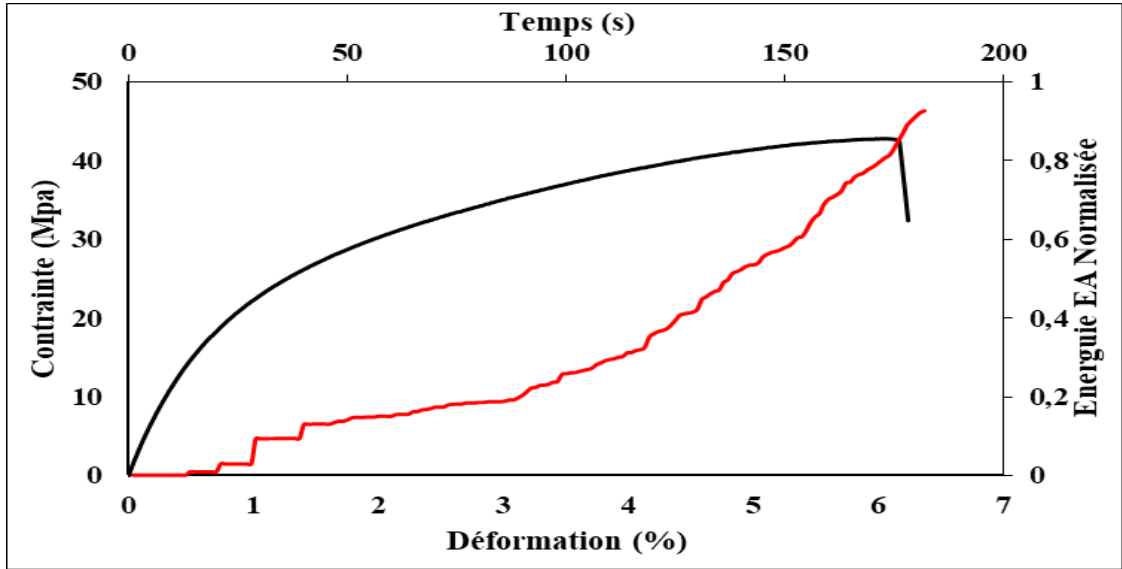


Figure C.57 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 30 % de fibre kraft avant vieillissement

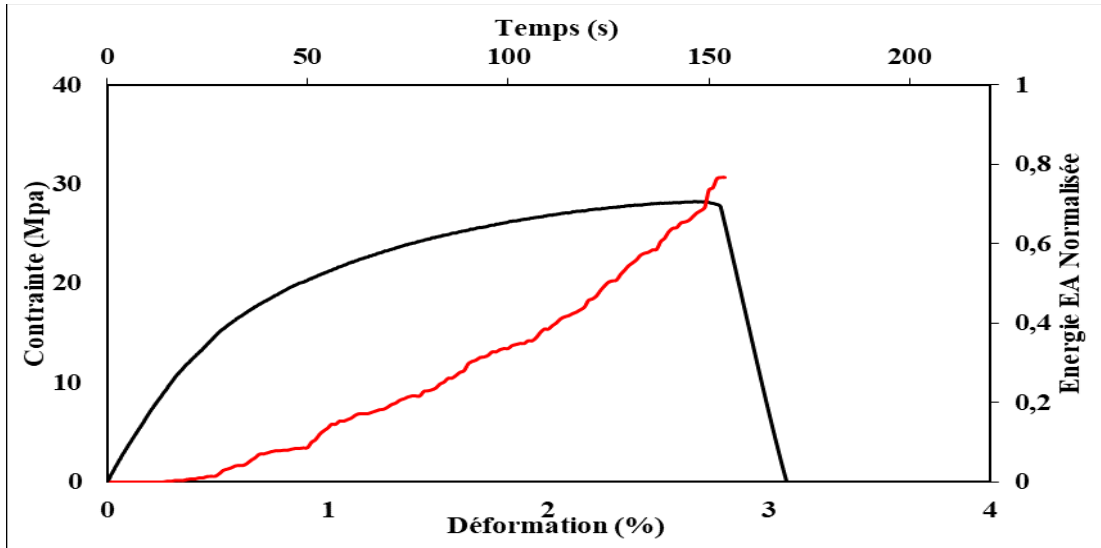
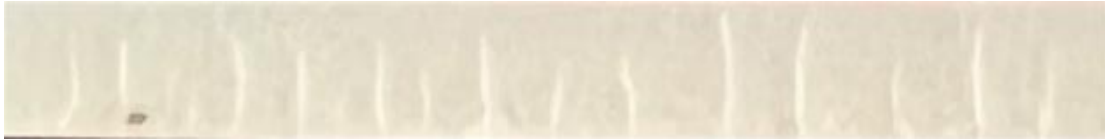


Figure C.58 Résultats de traction avec émission acoustique pour le composite qui contient 30 % de fibre de kraft après 1440 heures de vieillissement

Annexe D Évolution des fissures lors du test de traction



A



B

Figure D.59 Évolution des fissures lors du test de traction pour des échantillons vieillis à 1440 heures avec 30 % de fibres A) kraft, B) bouleau