

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ 20 AOÛT 1955 SKIKDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie des Polymères

ETUDE DES PROPRIETES D'UN NOUVEAU MATERIAU COMPOSITE

Soutenu le 06/07/2023

Réalisé par :

- LAIDI Samia
- SASSANE Khadidja

Encadré par :

Dr. DAIRI Badrina
Dr. BELLILI Nadira

Année Universitaire 2022- 2023



Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail.

*Nous exprimons nos profonds remerciements à notre encadrante **Dr. DAIRI Badrina**, pour l'aide qu'elle nous a apporté, pour son patience et son disponibilité à notre égard et pour ses conseils multiples qui nous ont été très précieux pour structurer le présent travail et pour améliorer la qualité des différentes sections de notre mémoire.*

*On remercie également notre co-promotrice **Dr. BELILI Nadira** pour sa gentillesse, ces conseils et son aide.*

On tient à adresser notre profonde reconnaissance à l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

*Je remercie également tous les personnels de l'unité **POLYMED CP2K de SKIKDA** en particulier ceux de laboratoire chacun par son nom.*

Nous remercions également nos famille pour leurs conseils et Encouragements.

Enfin, nous remercions tous nos amis sans les nommer, car ils se reconnaissent eux-mêmes.

Dédicaces

Tout d'abord, je tiens à remercier **Allah** de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je dédie ce travail

A mes parents qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

*A mes adorables soeurs et mes petites frères « **Abd El Malek, Ahmed Yahia** ».*

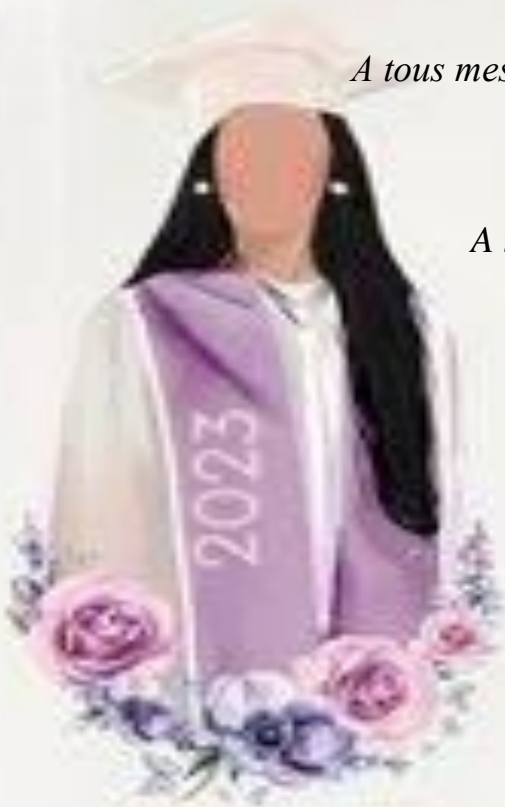
*A toute la famille **LAIDI** mes très chers amis, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.*

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui

Je souhaite plus de succes.

A tous ceux que j'aime je dédie ce travail.

Samia LAIDI



Dédicaces

Merci et louange à Dieu.

Tout merci aux professeurs, enseignants et éducateurs ..aux parents..

mon père .. mes sœurs ..mon frère .. ma petite nièce **Mayar** mes parents et amis les plus chers .à mes êtres chers.

A la chère qui était toutes les aspirations de voir le fruit, le fruit de l'effort inachevé..
son effort dans la vie et notre charcuterie.

SASSANE Khadidja



LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Généralités sur les matériaux composites	page
Figure I.1 : Structure d'un matériau composite	4
Figure I.2 : Classification schématique des différents types de composites.....	5
Figure I.3 : Classification des matériaux composites.....	7
Figure I.4 : Types de matrices.....	8
Figure I.5 : Schéma représentatif du polyéthylène.....	11
Figure I.6 : Matière première de PE sous forme de granulés et de tubes en PEHD.....	13
Figure I.7 : Classification des Renforts.....	14
Figure I.8 : Classification la fibre végétale	15
Figure I.9 : Disposition hélicoïdale des fibrilles de cellulose dans une fibre végétale.....	16
Figure I.10 : Structures Schématique d'une fibre végétale.....	17
Figure I.11 : Structure de la molécule de cellulose	17
Figure I.12 : Principe aux constituants des hémicelluloses.....	18
Figure I.13 : Exemple générique de la molécule de la lignine	19
Figure I.14 : Composition chimique des fibres de Diss en matière sèche (% en poids)	19
Figure I.15 : Structure du bois (observations multi échelles).....	20
Figure I.16 : Exemple de défaut structural sur une fibre de lin.....	21
Figure I.17 : Directions principales dans une pièce de bois.....	25
Figure I.18 : Différentes échelles d'observation d'un bois de résineux : les tissus, la cellule et la paroi cellulaire	26
Figure I.19 : Représentation schématique d'une fibre de bois.....	27
Figure I.20 : Répartition mondiale des subéraies.....	28
Figure I.21 : La composition chimique du liège	29
Figure I.22 : Microparticules de liège	29
Figure I.23 : Coupe transversale schématique d'une tige de Chêne-liège	30
Figure I.24 : Différents types de liège.....	31

Liste des figures

Chapitre II :

Rappels bibliographiques

Figure II.1 : Variations de la résistance à la traction et du module dans diverses formulations de composites	43
Figure II.2 : Effet du motif de tissage sur la résistance à la traction de divers composites.....	45
Figure II.3 : Comparaison de la résistance à la traction de composites hybrides avec des composites à fibre unique (sisal / chanvre) à 30% de charge de fibre	48

Chapitre III :

Matériaux et techniques expérimentales

Figure III.1 : Les différentes étapes d'élaboration et caractérisation de matériaux bio composites PEHD/FIBRES	58
Figure III.2 : PEHD 5502 sous forme d'une poudre	59
Figure III.3 : Préparation et tamisage des charges	60
Figure III.4 : Mélangeur à deux cylindriques de marque IQAP-RLS-110... ..	62
Figure III.5 : Préparation des composites PEHD/Charge	62
Figure III.6 : Presse hydraulique	63
Figure III.7 : Pycnomètre utilisé pour déterminer la densité	63
Figure III.8 : Les échantillons immergés dans l'eau distillée	64
Figure III.9 : Appareillage de mesure de la dureté Shore D D2240... ..	65
Figure III.10 : Appareillage et Agencement expérimental pour le calcul de la résilience IZOD et Eprouvettes pour le test IZOD	66
Figure III.11 : L'appareillage de microscopie optique	67

Chapitre IV :

Résultats et discussion

Figure IV.1 : Evolution de la densité de différentes formulations élaborées PEHD vierge, PEHD/FB, PEHD/FL, PEHD/FB/FL	69
--	-----------

Liste des figures

Figure IV.2 : Evolution du taux d'absorption d'eau de différentes formulations PEHD vierge ; PEHD/Liège ; PEHD/Bois ; PEHD/Liège/Bois.....	70
Figure IV.3 : La variation de la dureté de différents composites élaborés PEHD/Liège, PEHD/Bois, PEHD/Liège/Bois	71
Figure IV.4 : La variation de la résilience de différents composites élaborés PEHD/Liège, PEHD/Bois, PEHD/Liège/Bois	72
Figure IV.5 : Micrographie en microscopie optique de la surface des composites, PEHD /Bois, PEHD/ Liège, PEHD/Bois/Liège	74

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : **Généralités sur les matériaux composites** **Page**

Tableau I.1 : Type de composite **6**

Tableau I.2 : Caractéristiques des résines thermodurcissables **9**

Tableau I.3 : Caractéristiques des résines thermoplastiques **10**

Tableau I.4 : Principales différences entre les thermodurcissables et les thermoplastiques .. **10**

Tableau I.5 : Quelques propriétés d'un polyéthylène à haute densité PEHD (à température ambiante)..... **12**

Tableau I.6 : Composition chimique de quelques fibres végétales.....**17**

Tableau I.7 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles**22**

Tableau I.8 : Domaines d'applications et parts de marché des composites à fibres naturelles**23**

Tableau I.9 : Avantages et inconvénients des fibres végétales **24**

Chapitre II :

Rappels bibliographiques

Tableau II.1 : Propriétés mécaniques des composites de polyester hybrides..... **51**

Chapitre III :

Matériaux et techniques expérimentales

Tableau III.1 : Principales caractéristiques du PEHD 5502..... **59**

Tableau III.2 : Composition des différentes formulations**61**

Chapitre IV :

Résultats et discussion

Tableau IV.I : Caractéristiques physico-chimiques de la farine de bois **68**

Tableau IV.2 : Caractéristiques physico-chimiques de la farine de liège **68**

LISTE DES ABREVIATIONS

GD : Grande diffusion.

HP : Haute performance.

TP : Thermoplastique.

TD : Thermodurcissable.

PE : Polyéthylène.

PP : Polypropylène.

PVC : Polychlorure de vinyle.

PS : Polystyrène.

PA : Polyamide

PEHD : Polyéthylène haute densité.

PEBD : Polyéthylène base densité.

L/D : Ratio d'aspect (longueur/diamètre).

FB : Fibre de bois.

FL : Fibre de liège.

NaOH : hydroxyde de sodium.

SLS : Laurylsulfate de sodium.

PLLA : Poly (L-lactique).

FGO : Farine de grignon d'olive.

ATG : L'analyse thermogravimétrique.

PS-g-AM : Polystyrène greffé d'anhydride maléique.

Liste des abréviations

PE-g-MA : Polyéthylène-anhydride maléique.

MEB : La microscopie électronique à balayage.

Vf : Fraction volumique.

PCL : Polycaprolactone.

MOE : Module d'élasticité.

MOR : Module de rupture.

PELD : Polyéthylène à basse densité.

WPC : Wood plastic composite.

TH : Taux d'humidité.

TMM : Taux de matière minérale.

TMC : Taux de matières cellulosique.

MO : Microscopie optique.

MFA : Microscopie à force atomique.

Sommaire

<u>SOMMAIRE</u>	Page
Introduction générale.....	1
Références bibliographiques	3
<u>Chapitre I :</u>	
Généralités sur les matériaux composites	
Introduction	4
I.1. Les matériaux composites	4
I.1.1. Généralités sur les matériaux composites.....	4
I.1.2. Classification des matériaux composites	5
I.1.2.1. Classement suivant la nature des constituants.....	5
I.1.2.2. Classement suivant la morphologie	6
I.1.3. Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	7
A. Avantages des matériaux composites	7
B. Inconvénients des matériaux composites.....	8
I.2. Composants d'un matériau composite	8
I.2.1. La matrice.....	8
I.2.1.a. La matrice minérale.....	8
I.2.1.b. Les matrices organiques.....	9
I.3. Le polyéthylène	10
I.3.1. Définition.....	10
I.3.2. Réactions de polymérisation de l'éthylène	11
1- La polymérisation en chaîne	12
2- La polymérisation par étape.....	12
I.3.3. Le polyéthylène haute densité	12
I.3.4. Propriétés de PEHD.....	12
I.3.5. Mode d'obtention des polyéthylènes à haute densité	12

Sommaire

I.3.6. Application du PEHD.....	13
I.4. Renfort.....	14
I.4.1. Présentation des fibres naturelles	15
I.4.2. Classification des fibres naturelles	15
I.4.3. La Composition chimique des fibres végétales.....	16
I.4.3.a. La cellulose	17
I.4.3.b. L'hémicellulose	18
I.4.3.c. La lignine	18
I.4.4. Structure de la fibre végétale.....	20
I.4.5. Propriétés mécaniques de la fibre végétale	20
I.4.6. Application des fibres naturelles.....	22
I.4.7. Intérêt de l'utilisation des fibres naturelles	23
I.4.8. Avantages et inconvénients des fibres naturelles.....	24
I.5. Etat de l'art sur les fibres de l'étude.....	24
I.5.1. Quelques Généralités sur le matériau bois	24
I.5.1.1. Anatomie du bois.....	25
I.5.1.2. Composition chimique du bois	26
I.5.2. Fibre de liège (origine, composition, propriétés, application)	27
I.5.2.1. Origine	28
I.5.2.2. Composition.....	28
I.5.2.3. Ecorce (le liège).....	29
I.5.2.4. Propriétés	31
I.5.2.5. Application.....	31
I.6. Les paramètres influencent sur les matériaux composites	32
I.6.1. Influence du taux de renfort.....	32
I.6.2. Influence de l'orientation et de la dispersion du renfort.....	33
I.6.3. L'effet de l'humidité.....	33

Sommaire

I.6.4. Influence de la morphologie des fibres	33
I.6.5. Adhésion fibre-matrice.....	34
Références bibliographiques	35
 <u>Chapitre II :</u>	
Rappels bibliographiques	40
Références bibliographiques..... ;	54
 <u>Chapitre III :</u>	
Matériaux et techniques expérimentales	
III.1. Introduction	58
III.2. Produits et matériaux utilisés.....	59
III.2.1. La matrice	59
III.2.1.1. Polyéthylène haute densité (PEHD).....	59
III.2.2. Charges utilisées	59
III.2.2.1. Farine de bois.....	59
III.2.2.2. Poudre de liège	60
III.2.3. Tamisage.....	60
III.3. Techniques expérimentales.....	61
III.3.1. Préparation des différents composites	61
III.4. Malaxage	61
III.5. La thermo-compression	62
III.5.1. Préparation des éprouvettes	62
III.6. Techniques de caractérisation des matériaux élaborés	63
III.6.1. Tests physiques	63
III.6.1.1. La densité	63
III.6.1.2. Test d'absorption d'eau.....	644
III.6.2. Tests mécaniques	65
III.6.2.1. Dureté Shore D.....	65

Sommaire

III.6.2.2. Résistance au choc IZOD	66
III.6.3. Analyse morphologiques	67
III.6.3.1. Caractérisation morphologique par microscopie optique.....	67
<u>Chapitre IV :</u>	
<u>Résultats et discussion</u>	
IV.1. Caractérisation de la farine de bois et farine de liège.....	68
IV.1.1. Caractérisation physico-chimique de la farine de bois	68
IV.1.2. Caractérisation physico-chimiques de la farine de liège.....	68
IV.2. Caractérisation des composites hybrides.....	68
IV.2.1. Caractérisation physique.....	69
IV.2.1.1. Test de densité.....	69
IV.2.1.2. Test d'absorption d'eau.....	70
IV.2.2. Caractérisation mécaniques	71
IV.2.2.1. Test de Dureté Shore D.....	71
IV.2.2.2. Résistance au choc IZOD.....	72
IV.2.4. Caractérisation de l'état de dispersion de la farine de bois, et de la farine de liège dans la matrice polyéthylène haute densité.....	73
IV.2.4.1. Analyse de la morphologie par microscopie optique	73
Références bibliographiques.....	75
Conclusion générale.....	76

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, la responsabilisation et la conscience ont poussé l'être humain à l'utilisation des charges naturelles issues de la biomasse qui remplacent les charges synthétiques, minérales ou organiques dans la fabrication des matériaux afin de rendre le matériau plus au moins recyclable.

La famille des matériaux composites à fibres, apparue dans les années 1940 n'a cessé de se développer en raison de leurs propriétés mécaniques associées souvent à une faible densité. Leur bon rapport coût/performance ouvre une très large gamme d'application dans des domaines variés ; l'industrie aérospace, automobile, maritime, ferroviaire, le bâtiment, l'ameublement, la décoration [1].

L'idée d'utiliser des fibres végétales naturelles comme renfort dans une matrice de polymère n'est pas tout à fait nouvelle, mais dans un contexte où le recours à des ressources renouvelables tend à devenir une priorité, elle est désormais considérée comme une voie prometteuse et doit poursuivre sa contribution aux objectifs de développement durable tout en continuant à répondre aux préoccupations environnementales. D'autant que des industriels ont déjà mis au point la production de composites renforcés de fibres végétales pour des applications ciblées. Ils s'efforcent donc d'élargir leurs marchés qui sont encore modestes [2].

Bien que les fibres naturelles et leurs mélanges soient respectueux de l'environnement et renouvelables, leur accès est limité dans de nombreuses sources. Ceux-ci ont : une faible mouillabilité, une incompatibilité avec certaines matrices polymères et une forte absorption d'humidité. Les matériaux composites fabriqués à partir de fibres végétales inchangées présentent souvent des propriétés mécaniques insuffisantes.

Les composites bois-polymère, c'est-à-dire les matériaux à matrice polymère thermoplastique ou thermodurcissable et à renfort ou charge végétale (matériaux lignocellulosiques), est une nouvelle classe de matériaux nées de la prise de conscience sur la nécessité de préserver l'environnement.

De plus, les WPC's (wood plastic composites), offrent des avantages qui leur permettent de concurrencer les matériaux polymères à renforts ou charges conventionnels, telles que la craie, la fibre de verre, de carbone, etc. En effet, ils ont de bonnes propriétés mécaniques spécifiques, faible densité, coût réduit, bel aspect et la possibilité d'utiliser plusieurs types de fibres d'origine végétale autre que le bois [3].

Introduction générale

Le liège est l'écorce externe du chêne *Quercus suber* L, qui pousse principalement dans les régions méditerranéennes occidentales. L'écorce est récoltée manuellement tous les 9 à 12 ans selon un processus qui n'endommage pas l'arbre, lui permettant de continuer à se développer normalement. L'Europe détient environ 60 % de la superficie totale des forêts de chêne-liège et récolte plus de 80 % du liège dans le monde. Le Portugal est le principal producteur, responsable de la transformation de 49% de la quantité totale de liège récoltée dans le monde [4].

L'utilisation du liège comme matériau de renforcement dans les matériaux composites est due principalement au fait qu'il a un comportement viscoélastique d'écrasement et, par conséquent, une plus grande capacité d'absorption d'énergie. En outre, la fonction du matériau de la matrice est de donner une forme stable au matériau composite, de minimiser l'agglomération du renforcement, de le protéger contre les dommages et la détérioration, de conférer des propriétés spécifiques au matériau composite, telles que la ténacité et la résistance chimique [5].

Néanmoins, du fait de la nature hydrophobe des polymères et la nature hydrophile des matériaux lignocellulosiques, ces derniers lorsqu'ils sont incorporés dans un polymère hydrophobe, engendre une interface pas favorable au transfert de contraintes, des poches d'eau causant des cavités lors de la transformation et une mauvaise dispersion, ce qui conséquent conduit à un matériaux de faible propriétés mécaniques [6].

Pour mener à bien cette étude, ce mémoire sera subdivisé en quatre chapitres :

- **Le Premier chapitre** consiste à une recherche bibliographique sur les différents matériaux composites et leurs constituants.
- **Le deuxième chapitre** résume quelques rappels bibliographiques sur les travaux relatifs aux composites hybrides basés sur une matrice polymère et un mélange de différentes fibres naturelles (lignocellulosiques).
- **Dans le troisième chapitre** présente les matériaux utilisés, les protocoles expérimentaux et les procédés de mise en œuvre pour l'élaboration des différents composites. Ainsi que la présentation des différentes techniques de caractérisation.
- **Le dernier chapitre** sera consacré à la discussion des résultats obtenus à partir des différents tests effectués sur l'élaboration et la caractérisation des matériaux composites.

Enfin, une conclusion générale permet de résumer les résultats des travaux présentés et d'ouvrir de nouvelles perspectives de développement.

Références Bibliographiques

- [1] N.Anil, « composite get greener, Material today », pp12, (2001).
- [2] K.BOURAI, « Étude du comportement thermique d'un composite bois-polymère pour une application en rotomoulage », Mémoire de maîtrise, Université Laval, Canada, (2010).
- [3] EL HADJI, B, « Nouveaux matériaux composites thermoformables a base de fibres de cellulose », Institut National Polytechnique de Grenoble – INPG, (2008).
- [4] Ali sen, jan van den bulcke, nele defoirdt, joris van acker, helena pereira, « Thermal Behaviour Of Cork And Cork Components », Thermo chimica Acta 582 ; 94-100, (2014).
- [5] A. Sen, A. Velez Marques, J. Gominho, H. Pereira, « Study of thermo chemical treatments of cork in the 150-400 °C range using colour analysis and FTIR spectroscopy », Ind. Crop. Prod. 38 ; 132-138, (2012).
- [6] TALEL, B, « Utilisation d'une méthode optique sans contact pour décrire le comportement mécanique de composites bois/plastique 'WPC' », Thèse de Doctorat de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (2011).

Chapitre I :
Généralités sur les matériaux
composites

Chapitre I :

Généralités sur les matériaux composites

Introduction

Les matériaux composites ont plusieurs propriétés qui se caractérisent d'une rigidité, une résistance mécanique et chimique, une ténacité élevée ainsi qu'une grande légèreté. Cependant, qui les rendent résistants le plus longtemps contre des phénomènes environnementaux.

Plus particulièrement, les matériaux composites à matrice thermoplastique et à renfort fibres naturelles trouvent de plus en plus d'applications dans divers secteurs industriels tels que l'aéronautique, la construction automobile, le bâtiment, l'industrie chimique, pétrochimique...etc.

I.1. Les matériaux composites

I.1.1. Généralité sur les matériaux composites

Un matériau composite est la combinaison d'au moins deux constituants de natures différentes et immiscibles mais complémentaires. Leur combinaison permet d'avoir un matériau avec des propriétés importantes à celles des matériaux pris séparément [1]. Le matériau composite est composé d'une phase continue appelée matrice, et d'une autre phase discontinue appelée renfort qui ; présente des propriétés mécaniques (résistance et rigidité) meilleures à celles de la matrice. Une interphase se crée entre les deux constituants et aura le rôle de transmettre les contraintes de l'un à l'autre d'où l'établissement d'une bonne adhérence (Figure I.1).

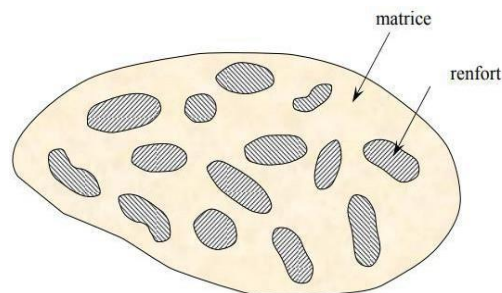


Figure I.1 : Structure d'un matériau composite [2].

On distingue deux classes de matériaux composites :

- ✓ **Composites de grande diffusion (GD)** : le taux volumique de la matrice est de l'ordre de 50 à 70%, peu onéreux, qui occupent une large part du marché.
- ✓ **Composites à hautes performances (HP)** : le taux volumique varie de 40 à 50%, généralement renforcés de fibres continues de carbone ou d'aramide, sont réservés à des secteurs de forte valeur ajoutée : aéronautique, médical, sports et loisirs [3].

I.1.2. Classification des matériaux composites

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites qu'on peut classer soit selon la forme des composants ou suivant la nature des composants [4].

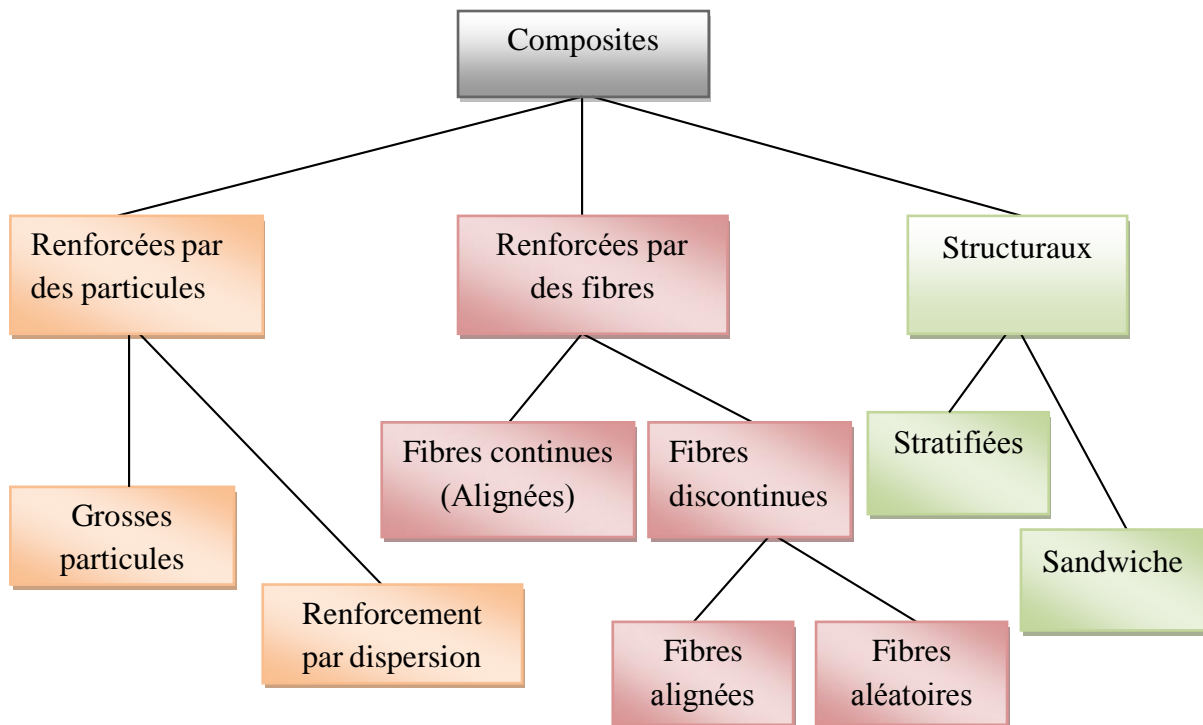


Figure I.2 : Classification schématique des différents types de composites.

I.1.2.1. Classement suivant la nature des constituants

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en quatre familles en fonction de la nature de la matrice [5].

Tableau I.1 : Type de composite [5].

Type de composite	Constituants	Domaines d'application
1. Composites à matrice	Résine/charges/fibres	Imprimerie, emballage, etc.
Organique	cellulosiques	Menuiserie
Papier, carton	Résine/copeaux de bois	Bâtiment
Panneaux de particules	Résine/fibres de bois	Sports, bâtiment
Panneaux de fibres	Résines souples/tissus	Toiture, terrasse, etc.
Toiles enduites	Elastomères/bitume/textiles	Automobile
Matériaux d'étanchéité	Caoutchouc/toile/acier	Domaines multiples
Pneumatiques	Résine/charges/fibres	
Stratifiés	de verre, de carbone, etc.	
Plastiques renforcés	Résines/microsphères	
2. Composites à matrice	Ciment/sable/granulats	Génie civil
Minérale	Carbone/fibres de carbone	Aviation, espace, sports,
Béton	Céramique/fibres céramiques	biomédecine, etc.
Composite carbone/carbone		Pièces thermomécaniques
Composite céramique		
3. Composites à matrice métallique	Aluminium/fibres de bore	Espace
	Aluminium/fibres de carbone	
4. Sandwiches	Métaux, stratifiés, etc.	Domaines multiples
Peaux	Mousses, nids d'abeilles,	
Ames	balsa, plastiques renforcés,	

I.1.2.2. Classement suivant la morphologie

Une manière simple consiste à les classer par les formes des renforts (selon leurs morphologies). Les composites sont donc divisés en quatre catégories suivantes (**Figure I.3**) :

- ❖ **Composites à renforts de particules** : Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.
- ❖ **Composites à renforts de paillettes** : Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces « particules minces » est

généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'un à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan.

- ❖ **Composites à renforts de fibres** : Une fibre a une longueur bien supérieure aux dimensions de la section transversale. Ce type de composites peut être divisé selon les renforts en fibres discontinues (courtes) ou en fibres continues (longues).
- ❖ **Composites stratifiés** : Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification.

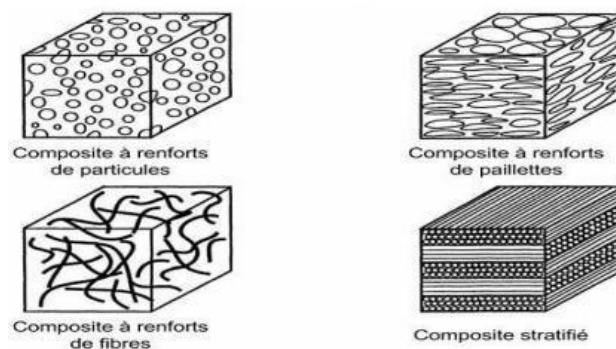


Figure I.3 : Classification des matériaux composites [6].

I.1.3. Avantages et inconvénients des matériaux composites

A. Avantages des matériaux composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Leur légèreté.
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit [7].

B. Inconvénients des matériaux composites

Inconvénients qui freinent leur diffusion :

- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

- L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que :
- La maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène.
- La maîtrise des procédés de transformations et des performances des matériaux qui sous-entend une très bonne connaissance des constituants mis en place.
- La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de la plupart des composites [7].

I.2. Composants d'un matériau composite

I.2.1. La matrice

La matrice a pour rôle de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (Résistance à la compression ou à la flexion), répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit. La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres [8].

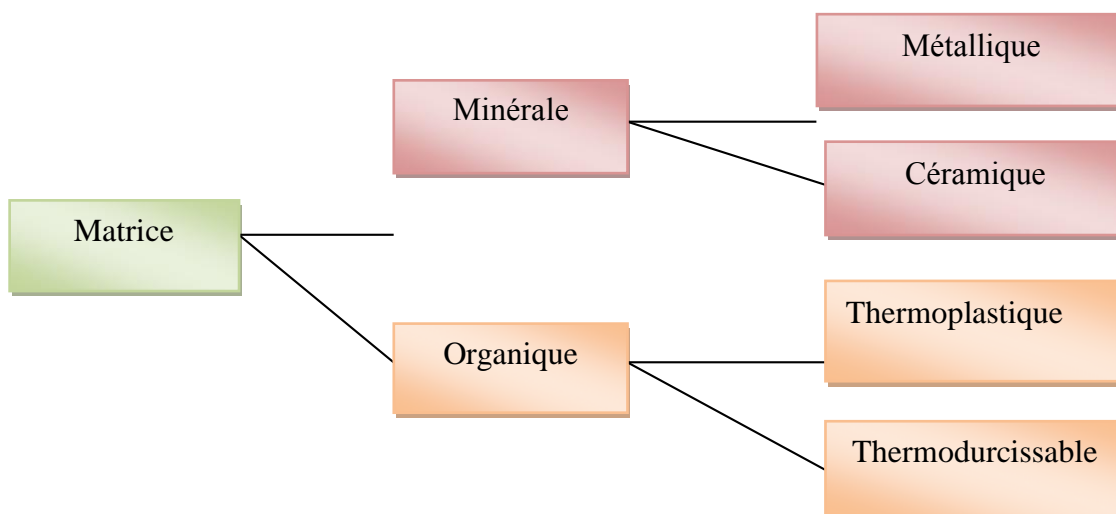


Figure I.4 : Types de matrices.

I.2.1.a. La matrice minérale

- **La matrice céramique** : Les matériaux utilisés sont les carbures de silicium et de carbone. Ils sont utilisés pour la fabrication des pièces qui subissent des contraintes d'origine thermique et leur coût est très élevé [9].
- **La matrice métallique** : Alliages d'aluminium, titane et magnésium. Elles offrent une résistance mécanique élevée et possèdent pour certains un bon comportement à hautes

températures. C'est pour cela qu'elles sont utilisées dans l'aéronautique pour la réalisation des pièces des réacteurs [10].

I.2.1.b. Les matrices organiques

Les matrices organiques sont les matrices les plus utilisées pour fabriquer des composites, grâce à leurs propriétés (résistance à la corrosion et aux produits chimiques, faible coût et facilité de mise en œuvre ...). De plus, les matières organiques sont appelées polymères et peuvent être définies comme des chaînes de monomères (les monomères sont des molécules constituées principalement de carbone et d'hydrogène). Généralement, les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables, ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés, le plus souvent, ils sont amorphes et parfois cristallisés [11].

Les matrices organiques pouvant être divisées en plusieurs catégories : thermoplastiques, thermodurcissables et élastomères :

➤ Les thermodurcissables (TD) :

Un matériau thermodurcissable est un polymère structural tridimensionnel, qui ne peut pas revenir à son état solide d'origine après avoir chauffé en raison des grandes liaisons chimiques entre les macromolécules [12]. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les deux principales résines utilisées sont les polyesters (environ 70%) et les époxy (25%) [13].

Tableau I.2 : Caractéristiques des résines thermodurcissables [13].

Résines	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance (MPa)	Module d'Young (GPa)	Allongement (%)
Polyesters	1,2	80	4	2,5
Epoxy	1,1-1,5	130	4,5	2

➤ Les thermoplastiques (TP) :

Les thermoplastiques sont généralement des dérivés de monomères linéaires ou légèrement ramifiés.

Ces monomères constituant le motif de base qui est répété plusieurs fois pour au final former la chaîne polymère [12]. Les principales familles de thermoplastiques, sont les polyoléfines (les polyéthylènes (PE), les polypropylènes (PP), les plastiques à base de polychlorure de vinyle (PVC), les polystyrènes (PS), et les polyamides (PA) [13].

Tableau I.3 : Caractéristiques des résines thermoplastiques [13].

Résines	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance (MPa)	Module d'Young (GPa)	Allongement (%)
Polypropylène	0,9	30	1,2	20-400
Polyamide	1,1	70	2	200

Tableau I.4 : Principales différences entre les thermodurcissables et les thermoplastiques [14].

Matrices	TP	TD
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux a polymériser
résistance au choc	Assez bonne	Limitée
Moulage	Chauffage + refroidissement	Chauffage continu
Stockage	Illimité	Réduit
Résistance thermique	Réduite (sauf nouveau TP)	Bonne
Cycle	Court	Long (polymérisation)
Conditions de travail	Propreté	Emanations de solvants
Mouillabilité des renforts	Recyclables	Perdus ou utilisés en charges
Ferraille et déchets	Difficile	Aisée

I.3. Le polyéthylène

I.3.1. Définition

Les polymères, appelés communément "matières plastiques", sont inséparables de notre environnement et de notre vie pratique. Ils se sont imposés dans tous les domaines de nos activités : des objets les plus banals jusqu'à des applications techniques sophistiquées, en

passant par leur utilisation dans les produits d'hygiène ou alimentaires. Le plus souvent synthétiques, quelquefois naturels, ils doivent cet essor à leurs larges gammes de caractéristiques, (durs, mous ou élastiques, transparents ou opaques, isolants et quelquefois conducteurs, plus ou moins résistants aux conditions agressives de leur usage, toujours légers). C'est la nature particulière de leurs molécules en forme de chaîne, ainsi que la variété des modes d'assemblage qu'elles adoptent, qui sont à l'origine de cette diversité [15]. Le Polyéthylène est l'un des polymères les plus simples et les moins chers. C'est un plastique. Son nom vient du fait qu'il est le polymère obtenu par la polymérisation des monomères d'éthylène ($\text{CH}_2 = \text{CH}_2$) en une structure complexe de formule générique :

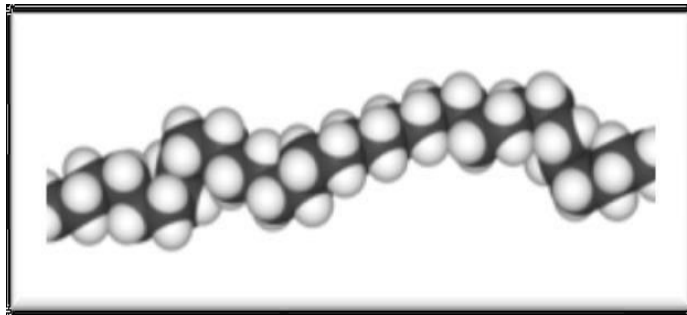
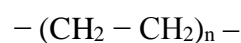


Figure I.5 : Schéma représentatif du polyéthylène [15].

Le polyéthylène est translucide, facile à manier et résistant au froid. Le polyéthylène est un thermoplastique. Cette matière plastique représente à elle seule environ un tiers de la production totale des matières synthétiques et constitue la moitié des emballages plastiques.

Plusieurs millions de tonnes de polyéthylène sont produites chaque année car c'est un matériau extrêmement polyvalent et important sur le plan économique et écologique. Grâce à sa structure chimique simple, le polyéthylène prime sur la plupart des autres matériaux car il peut être réutilisé. Au cours de ces dernières années, le recyclage des produits usés en PE a pris de plus en plus d'importance : 50% du PE constituant les sacs poubelle sont recyclés. Il existe différents polyéthylènes classés en fonction de leur densité. Celle-ci dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes dans le matériau [15].

I.3.2. Réactions de polymérisation de l'éthylène

Deux grandes méthodes de synthèse existent : la polymérisation en chaîne et la polymérisation par étape (polycondensation) [16].

1- La polymérisation en chaîne : C'est une réaction qui dépend non seulement de la nature du monomère, mais aussi fortement de la nature du centre actif. Les sites actifs localisés peuvent être de trois sortes :

- ✓ Un radical : donnant naissance à une polymérisation radicalaire,
- ✓ Un carbanion : donnant lieu à une polymérisation anionique,
- ✓ Un carbocation : donnant lieu à une polymérisation cationique [17].

2- La polymérisation par étape : Les réactions de polycondensation sont des réactions par étapes : la macromolécule est construite suite aux réactions successives entre les groupements terminaux de molécules monomères. La poursuite de ce processus conduit à l'obtention d'un polymère qui passe souvent par l'élimination d'une molécule d'eau ou de l'alcool [18].

I.3.3. Le polyéthylène haute densité

Le PEHD est un :

- Thermoplastique commercial semi-cristallin (typiquement 70-80%), blanchâtre, semi opaque.
- Polymère le plus simple et le moins cher.
- Un matériau écologique ; sa fabrication est propre, ne produit que peu de déchets et n'émet pas de substances nocives ; il est recyclables à 100% dont le traitement ne nécessite que peu d'énergie.

I.3.4. Propriétés de PEHD :

Le tableau se dessous présente quelques propriétés de PEHD [19] :

Tableau I.5 : Quelques propriétés d'un polyéthylène à haute densité PEHD (à température ambiante) [19].

Propriété du PEHD	Valeur
Valeur Module d'Young (MPa)	700 à 1400
Résistance en traction (MPa)	18 à 35
Conductivité thermique (W/m°K)	0,38 à 0,51
Température de transition vitreuse Tg (°C)	-125
Température de fusion Tf (°C)	135

I.3.5. Mode d'obtention des polyéthylènes à haute densité

La matière première du polyéthylène est sous forme de granulés noirs principalement et colorés pour le liseré de couleur déterminant l'application du tube bleu pour les tubes qui

transportent l'eau potable, jaune pour le gaz naturel. Les granulés sont aspirés par un aspirateur et stockés dans une trémie (Figure I.6) [20,21].



Figure I.6 : Matière première de PE sous forme de granulés et de tubes en PEHD [20].

I.3.6. Application du PEHD :

Le PEHD est capable de répondre à des exigences techniques pointues et permet ainsi la fabrication de produits de haute technologie. On va citer quelques applications.

a) Distribution d'eau potable : Après une première expérimentation dans les branchements, les hydrauliciens n'ont pas tardé à généraliser les tubes PEHD dans les réseaux de distribution d'eau potable et dans les réseaux d'adduction.

b) Distribution de gaz : Paradoxalement, les gaziers ont été les premiers à adopter les tubes PEHD en tant que produit exclusif dans les réseaux de distribution de gaz à moyenne pression (4 – 8 et jusqu' à 10 bars dans certains pays).

c) Assainissement sous pression : La bonne résistance chimique des tubes ; en PEHD vis-à-vis de l'agressivité des effluents, ainsi que l'absence de risque de pollution et ce, grâce à la qualité des assemblages (par soudage) et une bonne flexibilité ont conduit tout naturellement à leur prescription dans les réseaux d'assainissement sous pression, notamment lorsque le tracé s'avère accidenté.

d) Réseaux anti-incendie : Les tubes PEHD s'utilisent de plus en plus dans ce type de réseau, car ils ne fuient pas et ne se détériorent pas dans le temps sous l'effet de la corrosion, et ce, grâce à leur inertie chimique. Par ailleurs, pour les tronçons de réseau hors sol, il y a lieu d'utiliser des tubes en acier.

e) **Dessalement d'eau de mer** : Depuis l'avènement des grands diamètres, permettant le passage de grands débits, l'amenée de l'eau de mer vers les stations de dessalement se fait exclusivement en tubes PEHD. Ce quasi-monopole dans une telle application a été obtenu grâce à deux avantages : Une insensibilité à la salinité de l'eau de mer et une flexibilité qui permet aux conduites de résister durablement aux courants marins sans se détériorer.

f) **Emballage** : Le polyéthylène à haute densité (PEHD) est utilisé aussi pour fabriquer des emballages rigides de lait, de produits chimiques et de détergents ainsi que de réservoirs d'essence pour voitures [22].

I.4. Renfort

Le renfort est un matériau permettant d'améliorer les propriétés de la matrice dans le but d'assurer des meilleures propriétés du matériau composite à élaborer. Les composites sont souvent désignés selon la géométrie de renfort [23].

Il se présente généralement sous la forme de fibres, dont la conception de l'orientation au sein du composite dépend principalement de la direction du chargement mécanique à supporter. Les caractéristiques recherchées pour les fibres sont : La rigidité et la résistance mécanique élevée.

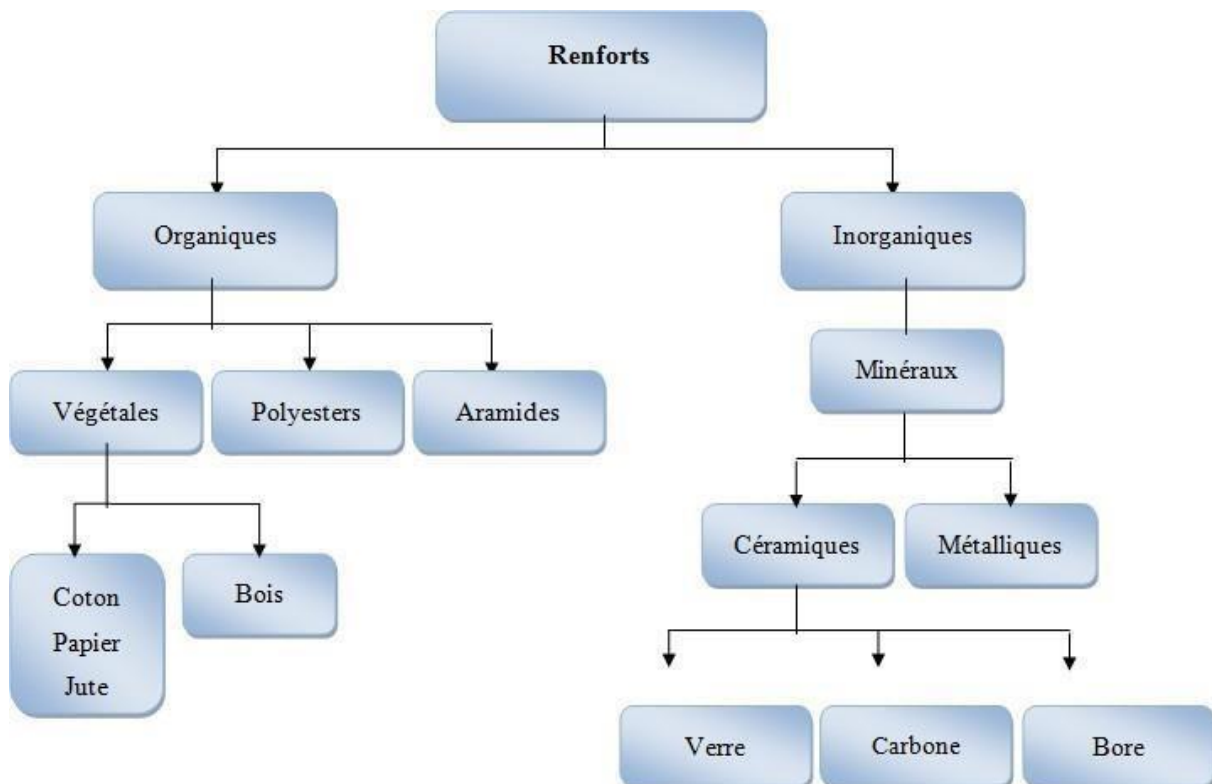


Figure I.7 : Classification des Renforts [24].

I.4.1. Présentation des fibres naturelles

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Égypte, où la paille et d'argile étaient mélangés pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges (**Figure 1.8**) [25, 26].

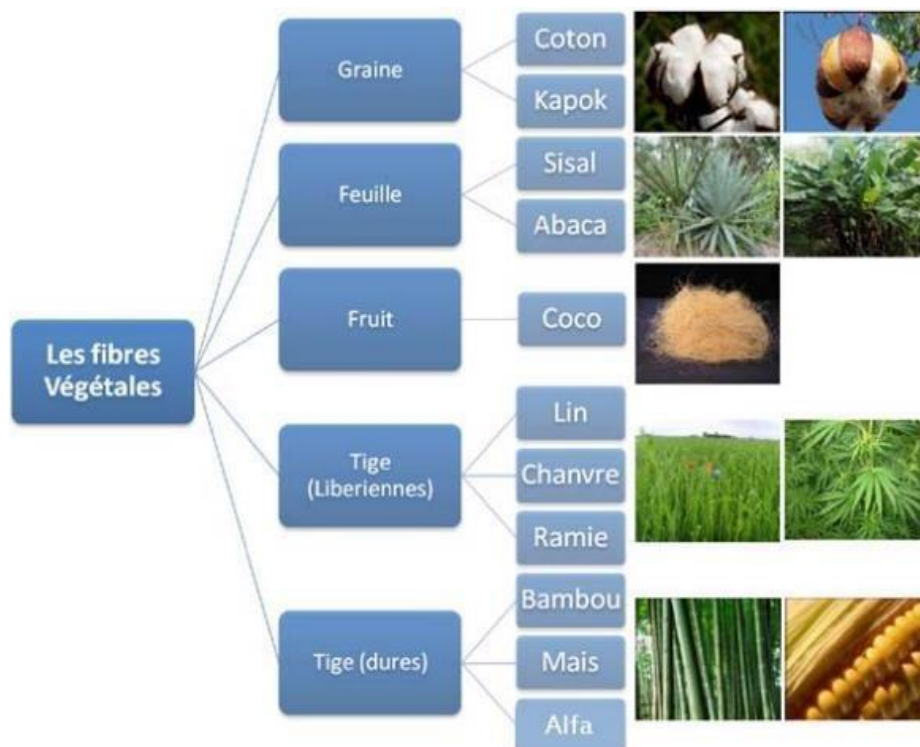


Figure I.8 : Classification des fibres végétales [27].

I.4.2. Classification des fibres naturelles

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine [28].

- **les fibres végétales** qui comprennent les fibres provenant des différentes parties de la plante.
- **Les fibres animales** qui proviennent des poils, telle que la toison animale, et des sécrétions telle que la soie ;
- **Les fibres minérales** comme l'amiante.

Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges.

❖ Les principales catégories de fibres agricoles sont :

- Fibres libériennes : extraites de la partie extérieure de la tige (lin, chanvre, jute, kénaf, ramie...)
- Fibres extraites des feuilles : fibres de sisal, de bananier, de palmier. . .
- Fibres extraites de poils séminaux des graines : fibres de coton, de kapok. . .
- Fibres extraites de l'enveloppe du fruit : fibres de coco. . .
- Fibres extraites des tiges ou des troncs : paille de blé, de riz, d'orge ou d'autres cultures telles que le bambou [23].

I.4.3. La Composition chimique des fibres végétales

La biomasse végétale est constituée de plusieurs macromolécules étroitement liées entre elles au sein de la paroi végétale.

Comme nous l'avons vu précédemment les composées les plus majoritaires sont la cellulose, l'hémicellulose, les pectines et les lignines. Ces différents constituants sont agencés de manière très complexe.

Dans le bois, la cellulose est concentrée à l'intérieur de la fibre. Les parois extérieures de la fibre sont composées principalement de lignines et d'hémicelluloses et les lamelles de jonction inter fibres sont composées presque uniquement de lignine. Un réseau supplémentaire de pectines augmente la complexité de la matrice. Le réseau polysaccharidique peut également être solidifié par un réseau secondaire de protéines.

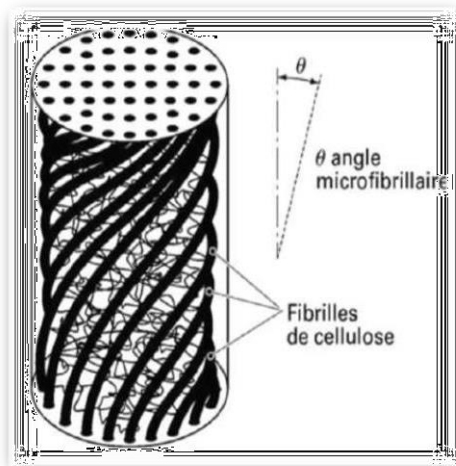


Figure I.9 : Disposition hélicoïdale des fibrilles de cellulose dans une fibre végétale [29].

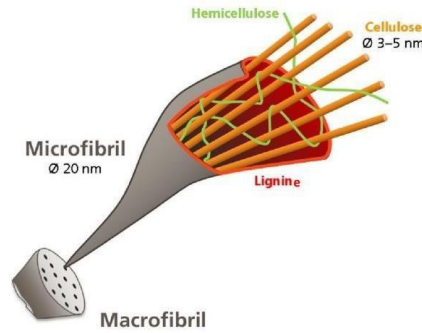


Figure I.10 : Structures schématique d'une fibre végétale.

Tableau I.6 : Composition chimique de quelques fibres végétales [30,31].

Fibres	Cellulose (%)	Hémicellulose(%)	Pectine (%)	Lignine (%)
Genêt d'Espagne	44,5	16,3	13,3	18,5
Jute	70	14	2	18
Coton	93	3	3	1
Lin	71	19	1	2
Ramie	75	15	2	1
Sisal	73	13	1	7
Alfa	45	24	-	24

I.4.3.a. La cellulose

La cellulose représente le polymère le plus abondant dans la surface de la terre, avec une production mondiale annuelle estimée à environ $1,3 \cdot 10^{10}$ tonnes. Ce polymère est l'un des principaux composants de la cellule végétale. Il s'agit d'un polymère linéaire « D-anhydroglucopyranose », constitué de successions d'unités reliées entre elles par des liaisons glycosidiques B-1.4. Chaque unité de cellulobiose est composée de deux glucoses. La cellulose est insoluble dans la plupart des solvants, à cause de son organisation, qui elle, est majoritairement cristalline [32].

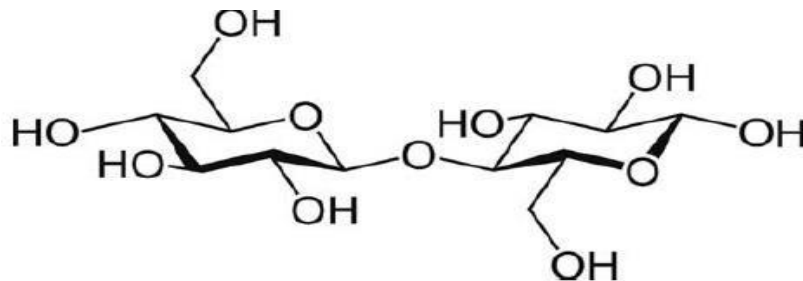


Figure I.11 : Structure de la molécule de cellulose [33].

I.4.3.b. L'hémicellulose

L'hémicellulose est le deuxième matériau organique le plus abondant sur terre après la cellulose. Elle possède une structure différente. Il s'agit des polysaccharides à chaînes plus courtes et à structure amorphe. Elle est composée de sucres neutres : xylose, arabinose, galactose, glucose, mannose, et d'acides uroniques.

La structure chimique de l'hémicellulose est variée selon l'origine de l'espèce végétale, le type cellulaire, la localisation dans la paroi ou bien encore l'âge des tissus. Ce polymère est caractérisé aussi par la solubilité dans le milieu alcalin. Le degré de polymérisation de ce polysaccharide à l'état naturel est compris entre 200 et 300 selon l'espèce [32].

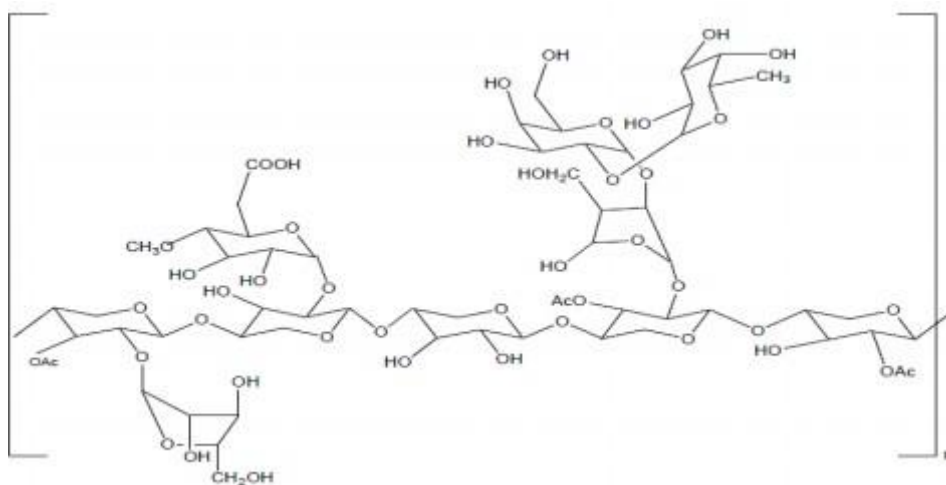


Figure I.12 : Principe aux constituants des hémicelluloses [34].

I.4.3.c. La lignine

La lignine est le composant liant dans les tiges d'alfa et en général dans les plantes. C'est le liant entre les fibres formant des faisceaux ou des tiges. Sans la lignine, les tiges d'alfa n'existeraient pas. L'extraction des fibres consiste en la libération des fibres ultimes en dégradant les composants non-cellulosiques comme la lignine. L'élimination de la lignine est appelée la délignification. Une structure de base (Figure I.13) de la lignine existe avec deux groupes fonctionnels qui peuvent varier, ainsi réalisant plusieurs molécules différentes de lignine. Par conséquent en réalité, le nom « la lignine » n'est pas correct car il s'agit de plusieurs molécules. Il est donc mieux de parler « des lignines ». Les liaisons covalentes sont relativement fortes, conduisant à une bonne résistance biologique et chimique. C'est pour cela que l'élimination de la lignine afin d'obtenir des fibres d'alfa est difficile. Les propriétés mécaniques des lignines sont faibles [35].

La lignine est une macromolécule extrêmement hétérogène composée de polymères aromatiques. Elle représente, après les polysaccharides, le polymère naturel le plus abondant sur terre. Elle participe à la rigidité structurale des parois cellulaires et protège les plantes contre l'attaque des organismes pathogènes. La lignine est une molécule à trois dimensions composée d'unités de phényle propane [36].

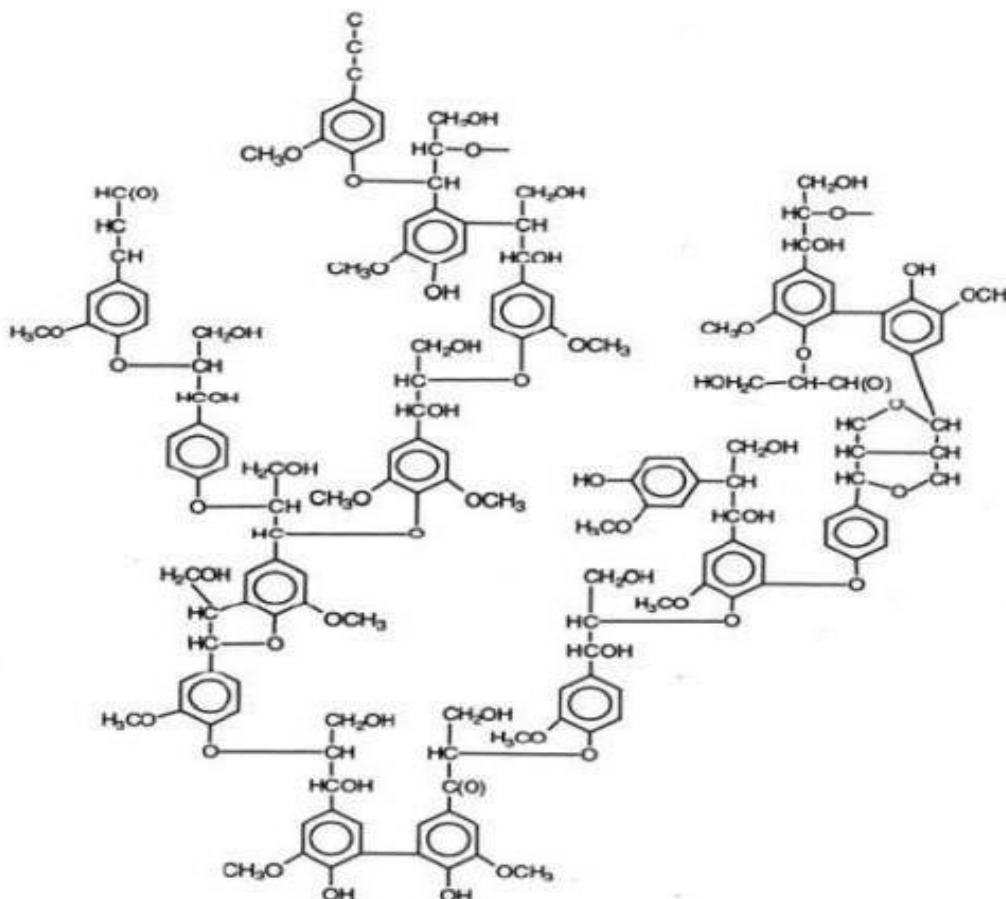


Figure I.13 : Exemple générique de la molécule de la lignine [37].

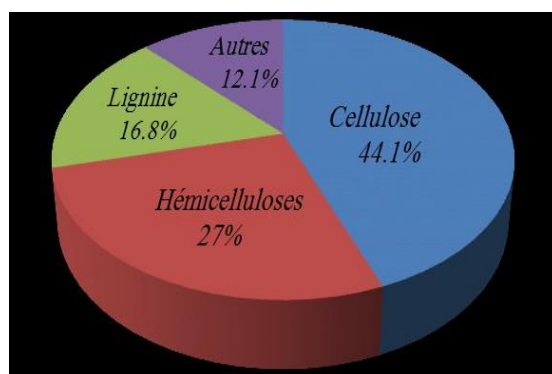


Figure I.14 : Composition chimique des fibres de Diss en matière sèche (% en poids).

I.4.4. Structure de la fibre végétale

La fibre végétale est un composite en elle-même. Le renfort est constitué par les couches de microfibrille celluloses en partie cristalline. Ce dernier est enrobé d'une matrice polysaccharidique amorphe (hémicellulose et pectine) qui est associée par liaison hydrogène et covalentes à la lignine [38].

La fibre végétale est composée de plusieurs parois parallèles à l'axe de la fibre et disposée en couche superposée dans le sens radiale. Ces différentes couches qui forment la lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire. Ces dernières bordent un lumen de diamètre variable suivant l'espèce. La paroi secondaire est composée de trois couches de microfibrilles (S1, S2, S3) (Figure. I.15).

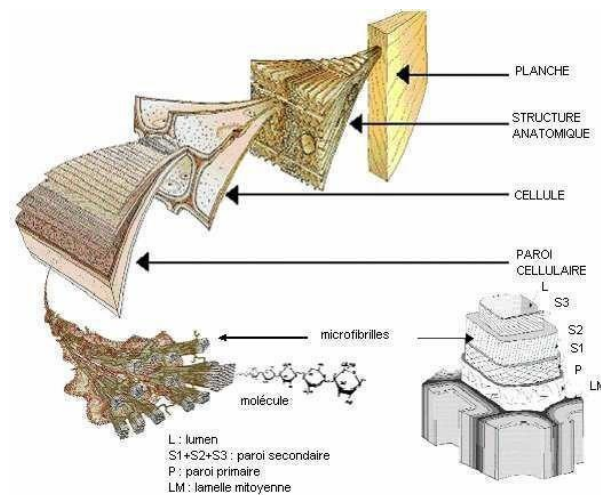


Figure I.15 : Structure du bois (observations multi échelles) [39].

I.4.5. Propriétés mécaniques de la fibre végétale

Il est très difficile de présenter un tableau qui répertorie toutes les propriétés des fibres lignocellulosiques. La grande variabilité constitutive et anatomique de la fibre végétale implique une variabilité de leurs propriétés mécaniques.

La faiblesse de la masse volumique des fibres végétales (1,2 à 1,5 g/cm³) confère à ces matériaux des propriétés mécaniques spécifiques intéressantes. Les fibres longues ont des contraintes en traction plus faibles que les fibres courtes, du fait que les premières ont de plus grandes probabilités de contenir des défauts de formation.

La cellulose cristalline est l'un des polymères ayant un module d'élasticité relativement plus élevé (90-137 GPa), comparé à celui de la fibre de verre qui est de 75 GPa.

Ainsi un taux de cristallinité de la cellulose d'une fibre élevé est indicateur de propriétés mécaniques élevées.

Les fréquents défauts structuraux (**Figure I.16**) observés de la surface des fibres sont des conséquences de la grande variabilité de morphologie, de composition chimique, de structure et de comportement mécanique spécifique de ces fibres [40].

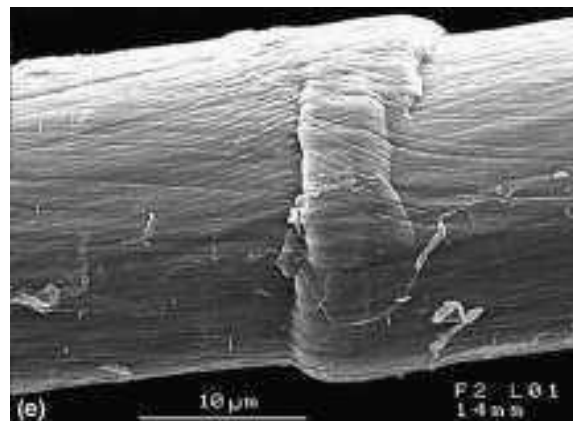


Figure I.16 : Exemple de défaut structural sur une fibre de lin [40].

L'angle micro fibrillaire explique en partie la déformation élastique de la fibre végétale et dès lors son allongement à la rupture en traction. En effet, sous l'action de forces de traction relativement faibles, la fibre lignocellulosique subit une déformation réversible du fait de l'alignement progressif des microfibrilles cellulosiques avec l'axe de la fibre et une déformation élasto-viscoplastique des polymères amorphes [40].

Si la sollicitation de la fibre est plus forte, la déformation de celle-ci entre dans une phase irréversible qui peut se poursuivre jusqu'à la rupture. Un angle micro fibrillaire élevé suppose une déformation élastique plus importante pour une sollicitation de la fibre en traction faible [41].

Le tableau ci-dessous présente les propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec certaines fibres de renforcement conventionnelles.

Tableau I.7 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles [38].

Fibre	Densité (g/cm ³)	Allongement(%)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
Coton	1.5-1.6	7.0 - 8.0	287–597	5.5-12.6
Jute	1.3	1.5 - 1.8	393–773	26.5
Lin	1.5	2.7 - 3.2	345–1035	27.6
Chanvre	–	1.6	690	-
Ramie	–	3.6-3.8	400–938	61 ,4
Sisal	1.5	2.0 - 2.5	511–635	128 6,4-
Coco	1.2	30.0	175	22 ,04
Verre E	2.5	2.5	2000–3500	4,06 – 6,0
Verre S	2.5	2.8	4570	70.0
Aramide	1.4	3.3 - 3.7	3000–3150	86.0
Carbone	1.4	1.4 - 1.8	4000	63.0-67.0

I.4.6. Application des fibres naturelles

Les fibres naturelles, en particulier les fibres végétales sont très fréquentes dans notre quotidien ; notamment dans les textiles, les cordes, les toiles et les papiers. Actuellement, avec l'intérêt croissant pour les produits respectueux de l'environnement, les fibres naturelles ont réussi à occuper une place importante en tant que renfort dans les composites [42- 44]. Tout d'abord, ces fibres trouvent une gamme d'utilisation très importante dans le domaine automobile et bâtiment. Les domaines d'applications et parts de marché des composites à fibres naturelles sont présentés dans le **Tableau I.8**.

Tableau I.8 : Domaines d'applications et parts de marché des composites à fibres naturelles [45].

Domaine d'application	Part de marché
Bâtiment	30%
Industrie automobile	25%
Equipements industriels	10%
Electronique	9%
Sport	8%
Construction navale et industrie de l'acier	6%
Génie électrique	6%
Industrie de l'aviation et l'espace	3%
Médecine	1%
Chemins de fer	1%
Eoliennes	1%

I.4.7. Intérêt de l'utilisation des fibres naturelles

D'une manière générale, l'utilisation des fibres naturelles comme renfort de matériaux composites se justifie pour :

- ❖ Valoriser une ressource locale dans des pays peu industrialisés, les composites à fibres naturelles ouvrant de nouveaux débouchés aux produits agricoles ;
- ❖ Développer des matériaux et des technologies prenant en compte les impacts sur l'environnement. Les fibres naturelles sont des matériaux de qualité qui se fabriquent et se recyclent naturellement sur terre depuis des millions d'années (matériaux biodégradables et renouvelables par culture) [46].

Les principaux avantages des fibres naturelles (**Tableau I.9**) sont leur coût, leur légèreté, leur disponibilité et leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées. Grâce à un compromis idéal rigidité/résistance/légèreté, les composites renforcés par des fibres végétales concurrencent efficacement les matériaux traditionnels contenant des charges ou fibres minérales.

I.4.8. Avantages et inconvénients des fibres naturelles

Tableau I.9 : Avantages et inconvénients des fibres végétales [47].

Avantages	Inconvénients
Faible coût	Absorption d'eau.
Leurs propriétés mécaniques sont spécifiques importants (résistance et rigidité).	Faible stabilité dimensionnelle.
Non abrasif pour les outillages.	Biodégradabilité
Neutre pour l'émission de CO ₂ .	Faible tenu thermique (200 à 300°C max).
Demande peu d'énergie pour être produite.	Fibres anisotropes
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres, leur biodégradabilité.	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo.
Pas de résidus après incinération	Pour des applications industrielles demande la gestion d'un stock
Bonne isolation thermique et acoustique	Renfort discontinu
Ressource renouvelable	

I.5. Etat de l'art sur les fibres de l'étude

I.5.1. Quelques Généralités sur le matériau bois

Le bois est un matériau hygroscopique, anisotrope et hétérogène (Cloutier, 2005 [48]). Il tend constamment vers un équilibre hygrothermique avec l'air qui l'entoure : à cet équilibre correspondent une teneur en humidité ainsi que des propriétés définies du bois. Au regard de son anisotropie, le bois ne présente pas les mêmes caractéristiques physiques et mécaniques dans toutes les directions. On lui reconnaît trois directions principales : la direction longitudinale (L), la direction tangentielle (T) et la direction radiale (R) (Figure 1.17).

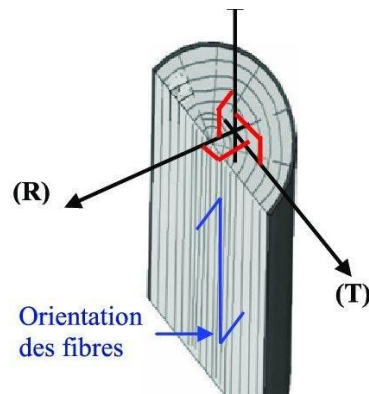


Figure I.17 : Directions principales dans une pièce de bois.

L'hétérogénéité du bois a pour origine sa composition en différents éléments résultants du métabolisme de l'arbre. En outre, le bois présente des variabilités étendues sur plusieurs aspects tels que les caractéristiques morphologiques et chimiques. Cette variabilité rend l'utilisation du bois plus complexe.

I.5.1.1. Anatomie du bois

Le bois est un ensemble de tissus cellulaires, hétérogènes et organisés qui constituent la masse principale du tronc des arbres (**Harrington, 1998 [49]**). Ces tissus naissent suite au fonctionnement de l'assise génératrice libéro-ligneuse, appelée également cambium, située sous l'écorce. Les essences de bois sont généralement classées en deux grands groupes, désignés sous le nom de résineux et de feuillus. Les feuillus sont des végétaux plus évolués que les résineux. Ils sont caractérisés par un bois plus complexe, des cellules plus spécialisées, des plans ligneux plus variés et leur identification est généralement plus facile. Les rôles de conduction de la sève et de soutien mécanique sont principalement assurés par les vaisseaux et les fibres ligneuses. Quant aux résineux, végétaux plutôt primitifs, ils présentent des cellules de bois peu spécialisées et un plan ligneux simple. Les trachéides longitudinales constituent environ 90 % du volume du bois des résineux. La **Figure I.18** illustre la structure anatomique d'un bois de résineux.

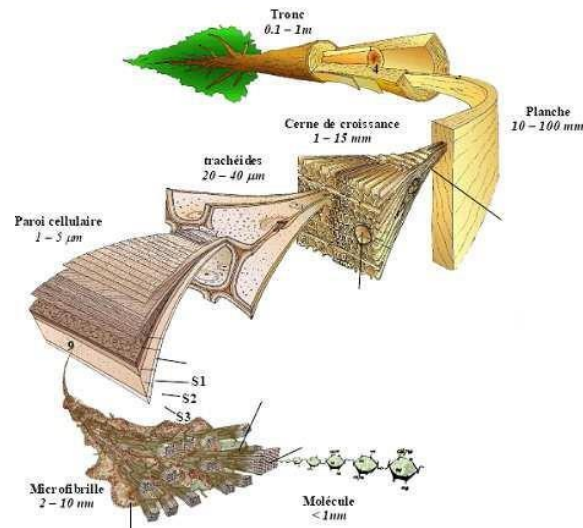


Figure I.18 : Différentes échelles d'observation d'un bois de résineux : les tissus, la cellule et la paroi cellulaire (Harrington, 1998 [49]).

I.5.1.2. Composition chimique du bois

Chimiquement, le bois se compose presque toujours de 50% de carbone, 42% d'oxygène, 6% d'hydrogène, 1% d'azote et 1% de matières minérales (qui se trouvent dans les cendres).

La matière principale constitutive du bois est la cellulose ($C_6H_{10}O_5$)_n, qui entre 50% dans la composition de 20 à 30 % de lignine [50].

Au niveau moléculaire, le bois est constitué principalement de bio polymères : la cellulose (40-50%), la lignine (15-35%) et les hémicelluloses (20% environ). A ces trois constituants, viennent s'ajouter des substances extractibles de nature organique et des substances minérales (cendres) [51].

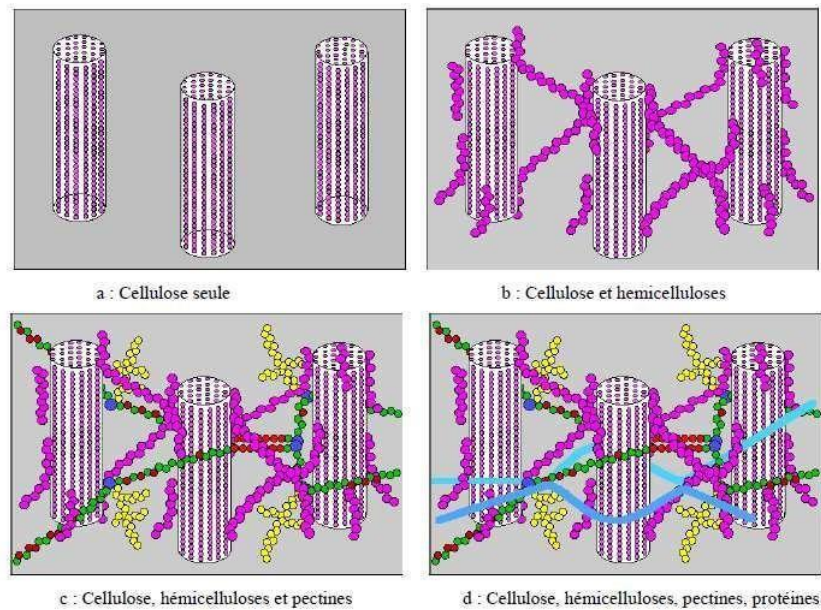


Figure I.19 : Représentation schématique d'une fibre de bois [52].

I.5.2. Fibre de liège (origine, composition, propriétés, application)

I.5.2.1. Origine

Le liège est un matériau vivant et naturel, provenant d'une variété de chêne-liège qui reconstitue son écorce dès qu'elle est prélevée chaque année. L'arbre produit une épaisseur de liège variant de 1 à 10 mm selon l'âge déjà acquis par l'écorce elle-même. Chaque accroissement annuel est séparé du précédent par une ligne brune bien déterminée. Du point de vue thermique et acoustique le liège est un très mauvais conducteur. Sa première utilisation en tant qu'isotherme remonte très tôt dans l'Antiquité dans la fabrication de ruchers. En ce qui concerne sa place dans la construction, on retrouve quelques traces des premiers emplois comme isolant thermique, parmi les populations primitives d'Afrique du Nord qui l'utilisaient en plaque et mélangé avec de l'argile pour la construction des murs de leurs habitations.

L'habitat naturel du chêne-liège est le pourtour du bassin méditerranéen occidental (présent depuis plus de 60 millions d'années). L'aire naturelle de la subéraie mondiale est d'environ 2687000 hectares repartis principalement sur sept pays (**Figure I.20**). Les principales subéraies algériennes sont situées essentiellement en zone sub-humide au nord, et entre l'Algérie et la frontière Tunisienne, ou elles s'étendent de la mer jusqu'à 1200 m d'altitude [53].

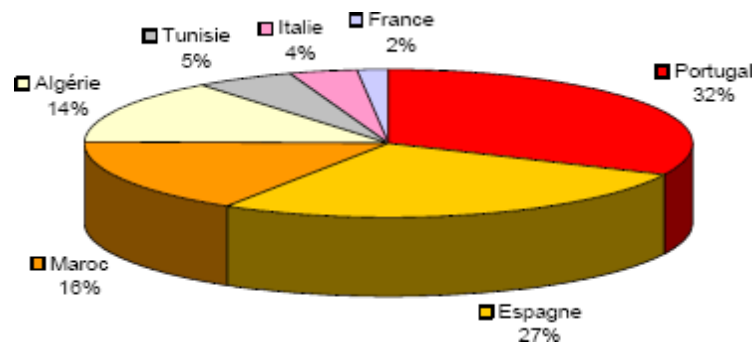


Figure I.20 : Répartition mondiale des subéraies.

I.5.2.2. Composition

Il n'est jamais superflu de rappeler les propriétés uniques du liège qu'aucun autre produit, qu'il soit naturel ou artificiel, n'a jusqu'à nos jours pu égaler :

- Léger,
- Imperméable aux liquides et aux gaz,
- Élastique et compressible,
- Excellent isolant thermique et acoustique,
- Incombustible,
- Très résistante à la friction

Ces multiples qualités du liège s'expliquent quand on étudie la composition exacte de ce matériau très spécial. Le liège est en fait un tissu végétal composé de icro cellules, ayant en général une forme polyédrique. Dans un centimètre cube de liège, on compte ainsi près de 40 millions de cellules. Les espaces intercellulaires sont remplis d'un mélange gazeux, identique à celui de l'air. Les caractéristiques spéciales du liège sont ainsi dues à la structure alvéolaire du tissu subéreux et à la nature de ses membranes cellulaires. L'analyse de la composition chimique de ce matériau permet d'identifier les différents composés et leur proportion en taux moyen :

- Subérine (45%) - Composant principal des parois des cellules du liège, responsable de son élasticité.
- Lignine (27%) - Élément qui contribue à la liaison entre les divers composants.
- Polysaccharides (12%) - Composants des parois des cellules du liège qui contribuent à la définition de sa texture.
- Tanins (6%) - Composés qui déterminent la couleur.
- Cireux (5%) - Composés hydrophobes qui assurent de l'imperméabilité.

- Divers (5%) - Minéraux, eau, glycérine et autres.

On constate ainsi que la composante principale du liège est la subérine, un mélange d'acides organiques à partir duquel se forment les parois de ses cellules, en empêchant le passage d'eau et de gaz. Les propriétés de la subérine sont uniques, car c'est un composant insoluble dans l'eau, l'alcool, l'éther, le chloroforme, l'acide sulfurique concentré, etc...

Chaque cellule de cette trame a la forme d'un prisme minuscule, pentagonal ou hexagonal, dont la hauteur ne dépasse pas les 40 à 50 micromètres (un micromètre = millième d'un millimètre). Les cellules plus petites mesurent 20 ou même 10 micromètres. Qu'elles soient grandes ou plus petites, toutes ces cellules sont gorgées d'un mélange de gaz qui ressemble à l'air. Une planche de liège contient environ 60% d'éléments gazeux, ce qui explique son extraordinaire légèreté. Cet aggloméré de petites alvéoles est responsable de la compressibilité inégalable du liège. Simultanément, grâce à l'imperméabilité que la subérine donne aux parois de la cellule du liège, celle-ci devient hermétique. Le gaz qu'elle contient ne peut en ressortir, ce qui explique l'élasticité et la mauvaise conductibilité thermique du tissu subéreux [53].

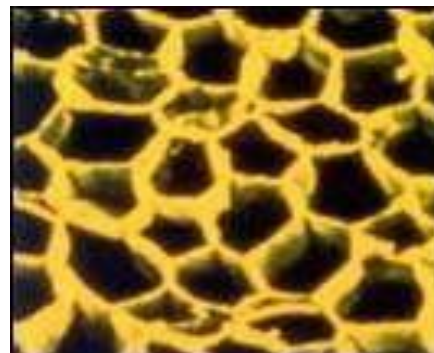
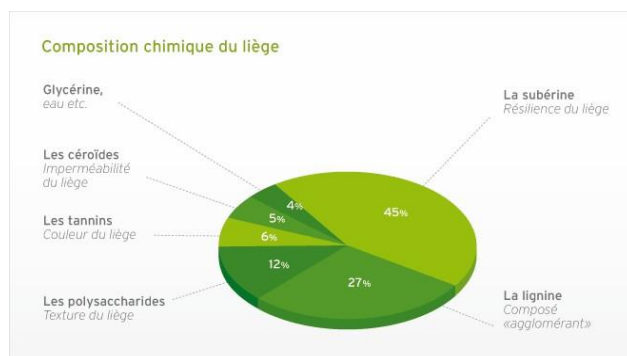


Figure I.21 : La composition chimique du liège.

Figure I.22 : Microparticules de liège

I.5.2.3. Ecorce (le liège)

I.5.2.3.a. La levée du liège

La levée du liège se déroule en 2 étapes :

- ❖ Le premier démasclage : c'est la récolte du liège mâle. On dit alors que l'arbre est mis en production, puisque le liège mâle, sans grande valeur, est retiré afin que se développe du liège femelle, économiquement plus intéressant car de meilleure qualité ;
- ❖ La levée périodique du liège femelle : La première récolte s'effectue lorsque l'âge de l'arbre atteint 25 ans, et peut être renouvelée environ tous les 8 à 12 ans, jusqu'à environ 120 ans. Cette récolte doit avoir lieu entre juin et août [54].

I.5.2.3.b. Anatomie du liège

De point de vue botanique, ce que nous appelons écorce représente la croissance en épaisseur ou croissance secondaire de la tige. Cette croissance découle de l'activité de méristèmes situés à la périphérie de la tige : le cambium et le phellogène (ou zone subéro phellodermique). Cette structure secondaire va se recouvrir d'un tissu de revêtement appelé le péri derme.

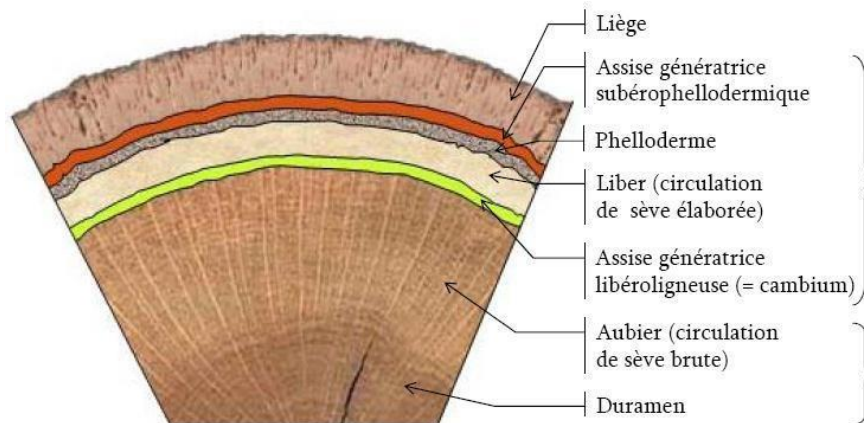


Figure I.23 : Coupe transversale schématique d'une tige de Chêne-liège [55].

Le liège de la première récolte n'est pas d'assez bonne qualité pour prétendre acquérir une valeur commerciale. C'est seulement lorsque l'arbre atteint une vingtaine d'années qu'un nouveau phellogène se forme à quelques millimètres sous le premier. Le liège produit par ce nouveau phellogène, s'épaissit très rapidement et, dix ans après, il est assez épais (27 mm) pour être prélevé de l'arbre. Ce phénomène se répète environ tous les neuf ans (donc la récolte se fait tous les neuf ans) durant toute la vie de l'arbre. Il y a une différence significative entre la première récolte et les récoltes successives [56]. Le premier liège récolté est appelé liège vierge ; il est irrégulier dans sa structure, épais, dense et rugueux (**Figure I.24 (a)**). Lors de la deuxième récolte ou première reproduction (neuf ans après), le liège possède une structure déjà plus régulière, plus lisse et intacte. La meilleure qualité de reproduction du liège est appelée « liège femelle » (**Figure I.24 (b)**).

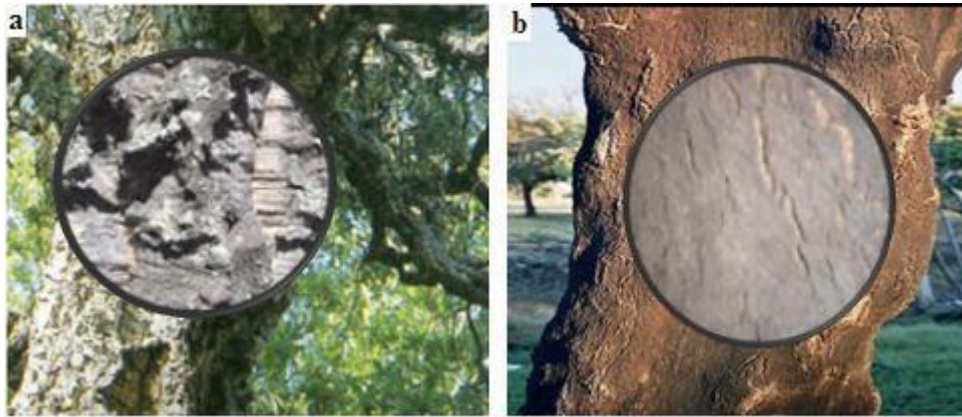


Figure I.24 : Différents types de liège : (a) liège vierge, (b) liège femelle [57].

I.5.2.4. Propriétés

- Sa densité est faible : 0,24.
- Le liège est chaud au toucher cela veut dire qu'il absorbe la chaleur ambiante pour la garder assez longtemps mais il ne conduit pas la chaleur, en revanche il la garde dans l'espace vitale (même par épaisseur réduite).
- Il protège l'arbre du froid et des intempéries tout en lui permettant de respirer par de minces canaux appelés lenticelles.
- Une imperméabilité élevée : Il est formé de minuscules logettes remplies d'air et délimitées par une paroi souple et imperméable à l'eau.
- Difficilement inflammable : en plus de sa souplesse, il se décompose lentement et résiste relativement bien au feu.
- Il est antistatique (hygiénique), il n'attire et ne retient pas la poussière contrairement à bon nombre de matières synthétiques.
- L'imputrescibilité lui assure une grande durabilité.
- 100% naturel, biodégradable, recyclable.

I.5.2.5. Application :

Son utilisation principale reste bien sûr le bouchon, ou plutôt les bouchons, tant il en existe des différentes sortes : le bouchon en liège naturel, le bouchon en liège colmaté, le bouchon en liège aggloméré, le bouchon technologique. Au-delà du traditionnel bouchon, il faut aussi souligner que le liège est employé en quantité très faible, mais parfois irremplaçable dans de nombreux domaines. Les produits, après transformation, sont principalement destinés aux activités industrielles suivantes :

- La construction en général (isolement thermique et acoustique, revêtement, décorations, cloisons) ;
- L'industrie du froid (chambres froides et transports frigorifiques) ;
- La construction navale (isolation, revêtement, décoration) ;
- L'industrie de l'automobile (joints) ;
- L'industrie des transports (isolation thermique, acoustique et vibratoire) ;
- L'industrie mécanique en général (joints d'étanchéité) ;
- L'industrie textile et la fabrication de chapeaux ;
- L'industrie chimique, pharmaceutique et la parfumerie (bouchage et conditionnement des produits) ;
- L'industrie de la pêche (bouées, flotteurs) ;
- L'industrie de la chaussure (semelles, talons,) ;
- L'industrie des emballages (granulés et laine de liège) ;
- La fabrication d'articles de sport (articles de pêche, raquettes, panneaux, balles) ;
- La chasse (bourre de cartouches) ;
- La fabrication d'articles de maison (nappes, boîtes de rangement, cadres, divers matériels de bureau) ;
- La musique (isolant phonique particulièrement performant dans les basses et moyennes fréquences ; cette utilisation nécessite des planches de liège de toute première qualité) ;
- La cristallerie (pour ses propriétés abrasives) ;
- La pyrotechnique (feux d'artifice) ;
- L'industrie spatiale (comme isolant thermique dans les navettes spatiales ; il fut d'ailleurs classé dans la catégorie des " matériaux stratégiques " par les U.S.A. pendant la 2ème Guerre Mondiale) [58].

I.6. Les paramètres influencent sur les matériaux composites

I.6.1. Influence du taux de renfort

L'augmentation du pourcentage de renforts améliore quasi systématiquement la rigidité d'un composite. Cependant, une trop grande quantité de renforts implique une adhésion plus difficile qui conduit à une baisse de performances dans certains cas. D'après la littérature, il est assez peu fréquent de trouver des composites fabriqués qui contiennent un

pourcentage de fibres supérieur à 50-60%, sans rencontrer de nombreuses difficultés lors du moulage [59].

I.6.2. Influence de l'orientation et de la dispersion du renfort

Il est évident que la dispersion du renfort qui conduit à un mélange plus ou moins intime des composants est un paramètre qui influence les propriétés physicomécaniques du composite. En effet les particules ou renforts ont tendance à se regrouper et à s'agglomérer ce qui crée des défauts. L'orientation des fibres génère une anisotropie, qui détermine des axes forts, pour le matériau, selon lesquels les fibres seront sollicitées longitudinalement (direction la plus résistante de la fibre). Ont étudié à l'aide de deux extrudeuses le rôle de la dispersion des renforts (farines, fibres). Les deux types de mélanges ont été réalisés afin de déterminer l'importance du ratio géométrique et de l'homogénéisation du mélange. Les résultats montrent que l'amélioration du processus de mélange permet une augmentation du module d'élasticité et de l'élongation à la rupture supérieure à 10% [60].

I.6.3. L'effet de l'humidité

Les propriétés mécaniques des composites renforcés par des fibres naturelles peuvent être réduites en grande partie dans des conditions humides. C'est une préoccupation profonde car il y a des potentielles d'applications extérieures, où l'absorption d'humidité peut avoir une influence significative sur ces matériaux. Les liaisons entre les fibres naturelles (qui contiennent l'hydroxyle et d'autres groupes polaires) et les matrices relativement hydrophobes de polymère seraient affaiblies avec la prise d'eau élevée. L'interface affaiblie va causer la réduction des propriétés mécaniques des composites. Par conséquent, l'effet de l'humidité sur les propriétés mécaniques est essentiel pour les applications des composites renforcés par des fibres naturelles. À cet égard, la résistance à l'eau de ces matériaux a pu être améliorée par la modification des fibres [61].

I.6.4. Influence de la morphologie des fibres

La morphologie des fibres inclut aussi d'autres paramètres que la longueur des fibres, comme leur diamètre, l'épaisseur des cellules et le diamètre des lumens. Ces paramètres varient tous à divers niveaux, en fonction de la nature des fibres. Les fibres de bois sont caractérisées par un rapport L/D élevé, mais sont souvent réduites en farine pour en faire des composites bois/polymère. Les traitements de surface des fibres réduisent considérablement le

rapport (L/D), mais augmentent considérablement l'adhésion et les propriétés mécaniques [62].

I.6.5. Adhésion fibre-matrice

Les phénomènes d'adhésion aux interfaces fibre-matrice jouent un rôle essentiel sur les propriétés des matériaux composites. De telles interfaces sont le siège de phénomènes physico-chimiques complexes dus aux interactions moléculaires entre deux matériaux de nature et de propriétés différentes, pouvant conduire à la formation de véritables interphases aux propriétés intrinsèques. Ces interfaces et interphases doivent être en mesure de supporter toutes les contraintes mécaniques, résiduelles ou externes, et de les transmettre de la matrice à la fibre pour que les matériaux composites présentent les propriétés mécaniques à l'usage requises [63].

Références Bibliographiques

- [1] Berthelot D, « Matériaux composites », Masson (1996).
- [2] Berthelot J- M., « Mécanique des Matériaux et Structures Composites », ISMANS Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés. Le Mans, France (2010).
- [3] Ersan Putun, Basak Burcu Uzun, Ayse Eren Putun, « Composition of products obtained via fast pyrolysis of olive-oil residue. Effect of pyrolysis temperature », Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 79, 147-153 (2007).
- [4] Daniel Gay, « Matériaux composites », 3^{ème} édition, Paris, Hermès (1991).
- [5] Jean Marie Berthelot, « Mécanique des matériaux et structures composites », Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, Le Mans, France (2018).
- [6] Prombut, P, « Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels », Thèse de Doctorat, Toulouse (2007).
- [7] MA. Almaadeed, R. Kahraman, N. Khanam, S, AL-Maadeed, «Characterization of untreated and treated male and female date palm leaves », Mater Des, 43: 526–31 (2013).
- [8] H. DJEMAI, «Contribution à l'étude de l'endommagement dans les matériaux composites sandwichs », (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider- Biskra) (2017).
- [9] M. LAAREJ, « Etude par spectroscopie Raman et modélisation d'une résine composite STM », Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen (2010).
- [10] M. MALHA, « Caractérisation Et Modélisation De Matériaux Composites : Polymère Thermoplastique Renforce Par Des Fibres De Doum », Thèse de Doctorat, Université de Rabat (2013).
- [11] A.Lakhdari, « Modélisation en Volumes Finis de CND des Matériaux Faiblement Conducteurs par Courants de Foucault et de Déplacement », Thèse de Doctorat, Université de Biskra (2019).
- [12] A. Achour Achouak, « L. Elaboration et caractérisation des matériaux composites polyéthylène PE/Farine de bois » (2020).
- [13] Y.DJEBLOUN, « Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres », Thèse de Doctorat, Université de Biskra (2018).
- [14] J.Aucher, « Etude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable », Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale SPMII, INSA de Rouen (2009).

- [15] A, Nechad, « Elaboration d'une membrane de filtration d'eau à base de polyéthylène basse densité et de gypse de Bouzggaiïa », mémoire de magister, Université Hassiba Benbouali , Chlef (2008/2009).
- [16] A-F. Gourgues-Lorenzon et J-M. Haudin, « Matériaux pour l'ingénieur », Mines Paris Tech, Paris (2010).
- [17] J. L. Halary et F. Lauprêtre, « De la macromolécule au matériau polymère: synthèse et propriétés des chaînes », Belin (2007).
- [18] F. Montagne et G-W. Ehrenstein, « Matériaux polymères, structure, propriétés et application », Hermès Science Publications (2000).
- [19] Gottfried W.Ehrenstein, « Fabienne Montagne matériaux polymères ».
- [20] M. Fontanille et Y. Gnanou, « Chimie et physico chimie des polymères », Dunod, Paris (2005).
- [21] Shibata S., Cao Y., Fukumoto I., « Flexural modulus of the unidirectional and random composites made from biodegradable resin and bamboo and kenaf fibres », Composites: Part A, 39: p.640–646 (2008).
- [22] S, SADOUNE, « effet de la température, de la vitesse de déformation et de vieillissement sur la structure du PEHD », Thèse de doctorat, Université BADJI MOKHTAR – Annaba, P: 53 (2018).
- [23] S. NEDJMA, « Effet De La Modification Chimique Des Déchets Ligno-cellulosiques Sur Les Propriétés Physico-chimiques Des Composites Pvc », Papier Journal, Thèse de Doctorat, Université de Bejaia (2014).
- [24] (FR) Kenneth S. Whiteley, Geoffrey T. Heggs, Hartmut Koch, Ralph L. Mawer, Wolfgang Immel, « polyoléfines [connexion terminée], en Encyclopédie de chimie industrielle de Ullmann », DOI:10.1002 / 14356007.a21_487 (2000).
- [25] M. Abdelmouleh, S. Boufi, M.N. Belgacem, A. Dufresne, « Short natural-fibre reinforced polyéthylène and natural rubber composites : Effect of silane coupling agents and fibres loading », Composites Science and Technology 67, 1627-1639.167 (2007).
- [26] Suganti Ramarad, « Preparation and properties of kenaf bast fiber filled (plasticized) poly (lactic acid) composites », Master (2008).
- [27] S.BOUHANK, « Elaboration de matériaux composites PVC/fibres de Genêt d'Espagne : Formulations et caractérisations », Thèse de Doctorat, Université de Sétif 1 (2017).
- [28] Doan Thi Thu Loan, « Investigation on jute fibres and their composites based on polypropylene and epoxy matrices », Thèse de doctorat, l'université de Dresden (2006).

- [29] Mustapha M. Mise en œuvre, « caractérisation et modélisation matériaux composites: Polymère thermoplastique renforcé par des fibres de DOUM »(2013).
- [30] Mohanty A.K., Khan M.A., Hinrichsen G, « Influence of chemical surface modification on the properties of biodegradable jute fabrics-polyester amide composite », Composites Part A: Applied Science Manufacturing, Vol. 31, n° 2, 143-150 (2000).
- [31] Barreto A.C.H., Rosa D.S., Fechine P.B.A., Mazzetto S.E, « Properties of sisal fibers treated by alkali solution and their application into cardanol-based biocomposites », Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.42, 492-500 (2011).
- [32] BELOUADAH Z, « Contribution à l'étude d'endommagement et du comportement mécanique des matériaux composites renforcés par des fibres végétales existantes dans la région du Hodna », Thèse doctorat, spécialité génie mécanique, U .M.M.T.O (2017).
- [33] AUGIER, L, « Etude de l'élaboration de matériaux composites PVC/bois à partir de déchets de menuiserie : formulation, caractérisation, durabilité et recyclabilité », Thèse doctorat de l'institut National Polytechnique de Toulouse. Toulouse, p17 (2007).
- [34] G. Pritchard, « Plants move up the reinforcement agenda », Plastics, Additives and Compounding, 9, 40-43 (2007).
- [35] Privas E. Matériaux ligno-cellulosiques, « Élaboration et caractérisation », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (2013).
- [36] Do Thi VV, « Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non », Université de Grenoble (2011).
- [37] M, E. BOURAHILI, « Caractérisation d'un composite verre / époxy », Thèse de Doctorat, Présentée à l'Institut d'optique et Mécanique de Précision, (2014).
- [38] A.K. Bledzki, J. Gassan, « Composites reinforced with cellulose based fibres », Prog. Polym. Sci. 24 221–274 (1999).
- [39] F. Michaud, « Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage », thèse Phd, univ Laval (2003).
- [40] K.Charle, C.morvan, J.Bréard, JP.Jernot, M.Gomina, « Etude morphologique d'un composite naturel la fibre de lin », revue des composites et des matériaux avancées, Vol16, pp11-24 (2006).
- [41] R.M. Rowell, « Composite Materials from Agricultural Resources », Olsen, Ole; Rexen, Finn; Larsen, Jorgen, eds, « Research in industrial application of non food crops, I: plant fibers: Proceedings of a seminar »; Copenhagen, Denmark.Linkboy, Denmark Academy of Technical Science: 27-41 (1995).

- [42] Faruk O., Bledzki A. K., Fink H. P., Sain M, « Biocomposites reinforced with natural fibers », 2000–2010, Progress in Polymer Science, vol. 37, 1552-1596, (2012).
- [43] Oksman K, « Mechanical properties of natural fibre mat reinforced thermoplastic », Applied Composite Materials, vol. 7, 403–414 (2000).
- [44] Bledzki A. K., Gassan J, « Composites reinforced with cellulose based fibres », Progress in Polymer Science, vol. 24, (221-274 (1999).
- [45] Zimniewska M., Wladyka Przybylak M., Mankowski J, « Cellulosic Bast Fibres, their Structure and Properties Suitable for Composite Applications », Cellulose Fibers: Bio-and Nano-polymer Composites, 97–119 (2011).
- [46] Belkacem C, « Etude expérimentale du comportement mécanique des stratifiées a renfort en matières végétale », Mémoire de Magister, Université de Boumerdès (2006).[47] A. Mokhtari, « Modélisation du comportement et de la rupture des composites a matrices thermoplastiques », Thèse de Doctorat, Université de Tizi Ouzou (2016).
- [48] Cloutier A, « Anatomie et structure du bois. Notes de cours, chapitre 1 », Département des sciences du bois et de la foret, Université Laval (2005).
- [49] Harrington J.J, « Micro Fibril Angle in Wood. Ed B.G Butterfield, IAWA/IUFRO », New Zealand (1998).
- [50] F.GHOMARI, « Science des matériaux de construction », Université de Telemcen, Algérie (2004).
- [51] L.AUGIER, « Etude de l'élaboration de matériaux composites pvc/bois à partir de déchets de menuiserie : Formulation, caractérisation, durabilité et recyclabilité », Thèse doctorat de l'institut nationale poly technique de Toulouse. Toulouse (2007).
- [52] C Couhert, « Pyrolyse flash à haute température de la biomasse lignocellulosique et de ses composés - production de gaz de synthèse », Thèse de pour obtenir le de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris Energétique (2007).
- [53] H, D.ROZMAN, Y, S.YEO, G, S. TAY, A.ABUBAKAR, « The mechanical and physical properties of polyurethane composites based on rice husk and polyethylene glycol », Polymer Testing, 22, 617R23 (2003).
- [54] Cantat R., Piazzettar R., La levée du liège, « Guide technique et de vulgarisation, Institut Méditerranéen du Liège » (2005).
- [55] Charte de bonnes pratiques de la récolte de liège en Aquitain (2006).
- [56] Fialho C., Lopes F., Pereira H., (2001), « The effect of cork removal on the radial growth and phenology of young cork oak trees », Forest Ecology and Management, 141: 251-258.

- [57] Gil A.M., Lopes M.H., Pascoal N.C., Callaghan P.T., « An NMR microscopy study of water absorption in cork », *Journal of Materials Science*, 35: (1891-1900) (2000).
- [58] N.PETCHWATTANA, S.COVAVISARUCH, « Effects of Rice Hull Particle Size and Content on the Mechanical Properties and Visual Appearance of Wood Plastic Composites Prepared from Poly (vinyl chloride) », *Journal of Bionic Engineering* 10,110-117 (2013).
- [59] C.Klason, J.Kubat, H.Strömvall, « The efficiency of cellulosic fillers in common thermoplastics Part 1 Filling without processings aids or coupling agents », *Inter. J. Polymeric Mater*, 10, p. 159-187 (1984).
- [60] M. RAGOUBI, « Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne », thèse, Université Henri Poincaré Nancy 1 (2010).
- [61] C.P.L. Chow, X.S. Xing et R.K.Y. Li, « Moisture absorption studies of sisal fibre reinforced polypropylene composites », *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 306-313 (2007).
- [62] Soucy J, « Potentiel d'utilisation des fibres de papier dans la conception de composites bois polymères par une technologie d'extrusion », Thèse de Maîtrise en Ingénierie, Université du Québec, Canada (2007).
- [63] M. Nardin, « Interfaces fibre-matrice dans les matériaux composites », *Revue de composites et des matériaux avancés*, Lavoisier, Vol. 16, pp. 49-62 (2006).

Chapitre II :
Rappels Bibliographiques

Chapitre II

Rappels bibliographiques

Ce chapitre résume quelques rappels bibliographiques sur les travaux relatifs aux composites polymère/charge cellulosique.

J. W. Kim et al (2008) [1] ont étudié le comportement mécanique de diverses farines de bois obtenues d'arbres d'espèces différentes (cerisier, cèdre rouge, oranger, pin, érable, chêne...). Les différents composites obtenus par injection, ont montré une légère différence, mais statistiquement significative, de la résistance en traction et du module d'Young. Les auteurs ont suggéré que différentes espèces peuvent être utilisées pour la fabrication de composites. Mais le choix de l'espèce peut affecter les propriétés mécaniques. Ils rejoignent dans leur conclusion l'étude précédente dans le fait que les différences existantes entre chaque espèce influent sur la morphologie et la chimie de surface du composite.

H. S. Yang et al (2006) [2] ont démontré l'influence du procédé de transformation sur la dispersion, en conséquence sur les propriétés mécaniques de composites PP/Farine de cosse de riz et celles du PP/Farine de bois. Ils ont trouvé que les propriétés mécaniques en traction des composites préparés par une extrudeuse à double vis sont meilleures que celles de composites préparés par une mono vis. Ceci est expliqué par l'amélioration de la dispersion des charges dans la matrice. La résistance en traction et le module des composites ont montré une amélioration même en absence de l'agent modifiant. Avec l'incorporation de cet agent, ce progrès est beaucoup plus important pour les composites obtenus avec une double vis.

Ces conclusions, ont confirmé l'étude réalisée ultérieurement par **A. K. Bledzki [3]** et qui ont trouvé aussi des propriétés mécaniques intéressantes de composites PP/Fibre de bois préparés avec une extrudeuse à double vis, par rapport à celles de composites obtenus par des mélangeurs internes à différents taux de cisaillement.

La proportion de bois dans les CBP est un paramètre qui a été beaucoup étudié (Soucy, 2007). Généralement, l'ajout de farine de bois dans une matrice plastique augmente sa rigidité, mais diminue sa résistance, **Yam et al. (1990)[4]** ont conclu que la rigidité en flexion et en traction des CBP augmente avec la proportion massique de bois (de 0 à 60 %) tandis que la résistance en traction et la résistance à l'impact diminuent.

S. J. Kim et al (2008) [5] ont réalisé une étude comparative sur les propriétés mécaniques de composites PP/Fibre de bois et PP/Fibre de coton. Ils ont remarqué que la résistance en traction de composites PP/FB est conditionnée par la qualité de l'interphase. Cette résistance est meilleure pour de fortes interactions qui permettent un meilleur transfert des efforts à la matrice à travers l'interphase. A l'inverse, les composites PP/Fibre de coton exhibent un comportement différent indépendant de la qualité de l'interphase. Selon ces auteurs, ceci démontre que la résistance en traction des composites ne dépend pas seulement de l'adhésion interfaciale, mais peut dépendre aussi, de la taille des charges, de leur nature hydrophile et notamment de la nature chimique. D'un autre côté, ils ont pu montrer que la résistance en flexion de ces composites dépend, en plus, du grade de la matrice utilisée.

Carla Vilela et al [6] Ont étudié la valorisation de la poudre de liège servant à élaborer un nouveau composite à matrice bio polymère. Ils ont constaté une bonne interaction entre les deux composants et ont obtenu un matériau souple en diminuant le module d'Young à des pourcentages élevés de la poudre de liège.

Julson et al (2004) [7] ont étudié les propriétés mécaniques de CBP moulés par injection avec différentes tailles de farine de bois (420, 250, 177 μ m). Les résultats de cette étude ne permettent cependant pas de faire des liens entre la taille des particules de bois et les propriétés mécaniques des CBP. **Stark et Rowlands (2003) [8]** ont comparé les propriétés mécaniques de CBP à base de farine de pin à d'autres à base de fibres de bois de feuillu, obtenues par défibrage mécanique. Ils ont utilisé de 20 et 40 % en poids de bois dans une matrice de PP et le procédé de moulage par injection.

L'utilisation de fibres qui ont un rapport L/D élevé comparativement aux particules de farine augmente le MOR des CBP en flexion et en traction, augmente parfois le MOE et a un faible effet sur l'énergie d'impact. Cette étude mène à un résultat important : les propriétés mécaniques des CBP varient avec le rapport L/D, et non avec la longueur des particules.

Mansur et al (2002) [9] notent que de petites particules bien dispersées augmentent généralement les propriétés mécaniques. Le poly (méthylène (polyphenyl isocyanate)) s'est avéré être le plus prometteur des trois agents de couplage. De plus, les composites contenant une teneur de 30% en fibre de bois fournissent de bonnes propriétés mécaniques. En effet au-delà de cette proportion, de nombreux problèmes comme la faiblesse des liens mécaniques apparaissent. L'augmentation de la quantité de bois s'avère bénéfique si elle est accompagnée d'une amélioration de l'adhésion interfaciale.

S. M. Sapuan et al [10] Le but de cette étude était de déterminer les propriétés de traction des composites de polystyrène renforcés par des fibres courtes de palmier. L'augmentation de la charge des fibres dans la matrice de PS améliore le module de traction. Cependant, la résistance à la traction a diminué avec l'augmentation de la charge des fibres à cause de la mauvaise compatibilité entre l'interface de surface des fibres et la matrice. Elle peut être améliorée par l'introduction d'un traitement de surface sur les fibres.

S. Mishra et al [11] ont étudié l'effet de l'utilisation des fibres de la banane, du chanvre, et de sisal comme charges pour le renforcement des composites de polystyrène avec des taux de 55:45, 50:50, 45:55, 40:60 en poids (fibre- matrice). Les fibres naturelles ont été traitées avec de l'anhydride maléique.

Le module d'Young, module de flexion, résistance aux chocs et la dureté Shore- D ont tous diminué avec l'augmentation de la teneur en fibres non traitées dans les matériaux composites. Tandis que la contrainte à la traction et la contrainte à la flexion ne montrent pas une tendance spécifique avec l'augmentation de la teneur en fibres dans les matériaux composites. Les composites en fibres de sisal présentent la plus forte résistance mécanique pour tous les rapports.

Le traitement des fibres par l'anhydride maléique améliore les propriétés mécaniques, telles que son module d'Young, le module de flexion, contrainte à la traction, contrainte à la flexion, résistance aux chocs et la dureté Shore-D par rapport aux composites de fibres non traitées. Elle est due au phénomène de l'estérification de fibres.

Mirbagheri et al [12] Ont étudié les composites hybrides de polypropylène renforcé de farine de bois / fibre de kénaf selon un rapport fixe fibre / plastique de 40:60 et des rapports variables des deux renforts, à savoir 40:0, 30:10, 20:20, 10:30 et 0 :40 en poids. Le polypropylène a été utilisé comme matrice polymère, et de la farine de bois de 60 à 100 mesh (149 μm à 250 μm) et les fibres de kénaf de 40 à 80 mesh (177 μm à 400 μm) ont été utilisées comme fibre et renforcement de particules, respectivement. L'anhydride maléique et le peroxyde de dicumyle ont également été utilisés comme agent de couplage et initiateur, respectivement. Des essais de traction statique ont été effectués pour étudier le comportement mécanique des composites hybrides, l'effet hybride sur le module élastique des composites a également été étudié. D'après l'analyse du rapport d'aspect des deux fibres naturelles avant et après transformation en composites, les fibres de kénaf présentaient des rapports d'aspect considérablement plus élevés que la farine de bois., le module de traction et la résistance à la traction ont été améliorés lorsque des fibres de kénaf ont été ajoutées au système PP/FB

(Figure II.1). Les valeurs de la résistance à la traction augmentent régulièrement lorsque le rapport des fibres de kénaf augmente, une augmentation constante des valeurs de rigidité est également observée lorsque la fraction de fibre de kénaf est augmentée, cela signifie un renforcement plus élevé des fibres de kénaf par rapport à celui de la farine de bois. Par conséquent, on s'attendrait que les composites hybrides contenant de plus grandes proportions de fibres de kénaf aient un module élastique plus élevé, et la matrice polymère présente le module le plus faible. Et donc l'hybridation améliorer les propriétés mécaniques des composites plastiques à fibres naturelles, en ajoutant des fibres plus longues (comme kénaf) aux composites plastiques /farine de bois.

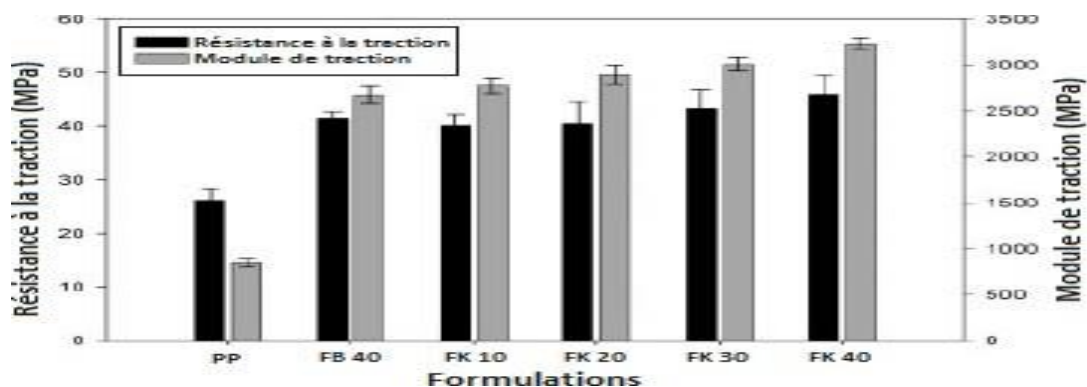


Figure II.1 : Variations de la résistance à la traction et du module dans diverses formulations de composites.

Alavudeen et al [13] Ont étudié l'effet des motifs de tissage et de l'orientation aléatoire sur les propriétés mécaniques des composites à base de polyester renforcés de fibres de banane et du kénaf. Les composites ont été préparés à la main avec deux motifs de tissage différents, à savoir le type uni et le type sergé. La **Figure II.2** montre les différents modèles de composites tissés de bananes, de kénaf et de tissus hybrides. La résistance à la traction des composites kénaf/polyester est plus élevée que celle des composites banane/polyester, quel que soit le motif de tissage comme le montre la **Figure II.2**, cela ne semble pas surprenant car la résistance des fibres de kénaf est plus élevée que celle des fibres de banane. Cependant, l'augmentation de la résistance à la traction du kénaf uni (**KP**) par rapport à banane uni (**BP**) est plus élevée que celle du kénaf sergé (**KT**) par rapport à banane sergé (**BT**). Parmi les deux types de tissage, le motif uni présente une résistance à la traction plus élevée que le motif en sergé, quel que soit le type de fibre utilisé pour renforcer la matrice de polyester. De plus, le composite hybride montre une augmentation significative de la résistance à la traction par rapport aux composites tissés purs de banane et de polyester renforcé de fibres de kénaf. Le

composite hybride banane/kénaf à tissage uni présente la résistance à la traction la plus élevée (139 MPa) que dans les composites à orientation aléatoire, Une augmentation de 54% de la résistance à la traction a été observée pour les composites tissé hybride uni (**HP**) par rapport aux composites tissé hybride sergé (**BP**) purs, alors que cette augmentation n'était que de 15% par rapport aux composites KP. L'augmentation de la résistance à la traction et du module des composites HP est attribuée aux différences dans les propriétés de partage des charges des fibres de kénaf et de banane dans les directions longitudinale et transversale. La résistance à la traction est plus élevée lorsque les fibres plus résistantes sont orientées longitudinalement de manière à supporter la charge de traction dans la direction des fibres. La fibre de kénaf la plus forte et la plus rigide est orientée dans la direction longitudinale, ce qui pourrait se traduire par une capacité d'absorption des contraintes plus importante et une résistance mécanique plus élevée. Ainsi, les composites hybrides fabriqués à armure toile ont été identifiés comme des composites à résistance mécanique maximale. En outre, les traitements à (NaOH) et au laurylsulfate de sodium (SLS) semblent apporter une amélioration supplémentaire de la résistance mécanique grâce à une meilleure liaison interfaciale. Ils sont conclus que : La résistance mécanique des composites hybrides tissés en fibres de banane et de kénaf augmente en raison de l'hybridation du kénaf avec les fibres de banane. Le comportement de fracture du composite indique qu'une meilleure adhérence fibre-matrice existe dans le composite hybride en raison de l'imbrication des fibres. Les résistances à la traction, à la flexion et aux chocs du composite hybride tissé de fibres de banane/kénaf sont supérieures à celles des fibres individuelles. Les propriétés mécaniques améliorées observées dans le cas de composites hybrides banane/kénaf tissés traités par SLS à 10 % ont montré des résultats supérieurs à la combinaison d'autres composites hybrides renforcés par des fibres naturelles.

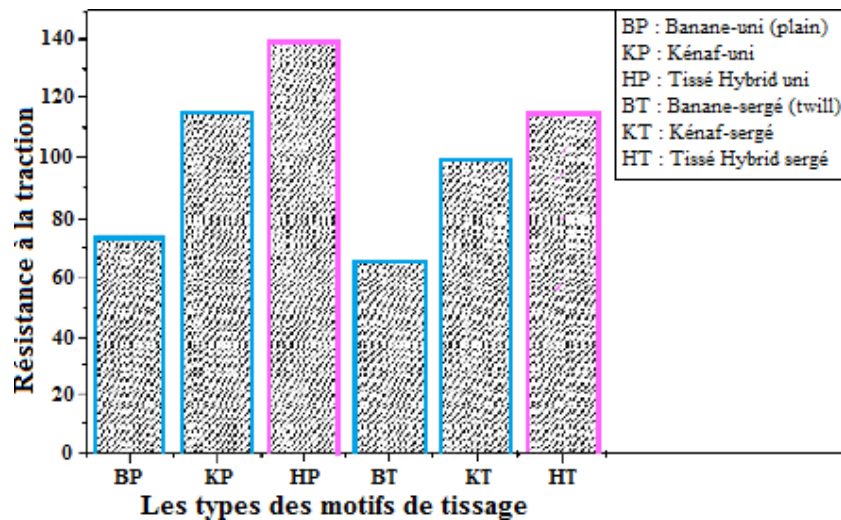


Figure II.2 : Effet du motif de tissage sur la résistance à la traction de divers composites.

Kamaker et al [14, 15] ont rapporté des résultats similaires. L'utilisation de 3% en poids de MAPP (6% en poids d'anhydride maléique) comme agent de couplage dans des composites jute/PP augmente les propriétés mécaniques. La résistance en traction est doublée, passant de 29,82 à 59,13 MPa et la résistance à la flexion augmente de 49,97 MPa à 87,66 MPa pour une teneur de 50% en poids de fibres. Des résultats similaires sont observés par **Khalid et al [16]** sur des composites PP/ fibres extraites du fruit du palmier à huile et par **Loan et al [17]** sur des composites PP/fibres de jute.

D. Bachtiar et al [18] ont étudié les propriétés mécaniques des composites de polystyrène (PS) renforcés par des fibres de palmier. L'adhésion entre matrice / fibre été provoquée par une modification de la surface des fibres par un traitement alcalin en utilisant une solution de NaOH à 6%. Ils ont constaté qu'il y a une amélioration de la résistance à la flexion, module de flexion et la résistance au choc des matériaux composites avec des fibres traités par rapport aux composites avec des fibres non traités. Tandis que l'utilisation d'un agent compatibilisant polystyrène-blockpoly (éthylène-ran-butylène)-block-poly (styrène-greffé-anhydride maleic) a montré une amélioration de la résistance au choc seulement.

J. P. Siregar et al [19] ont mené une étude sur l'effet du traitement alcalin des fibres de feuilles d'ananas sur les propriétés mécaniques des composites à base de polystyrène (PS). Les concentrations de NaOH à 2% et 4% utilisés pour traiter les fibres ont augmentées la valeur de toutes les propriétés mécaniques des composites telles que la résistance à la traction, le module de la traction, la résistance à la flexion, module de flexion, et la dureté. Le traitement avec une solution de NaOH à 4% a montré la valeur la plus élevée des propriétés mécaniques

par rapport à d'autre concentration. On peut conclure que l'adhérence entre fibre/matrice peut être améliorée par traitement des fibres avec une solution alcalin avant la production d'un composite.

L'étude menée par **H. Djidjelli et al [20]** sur les propriétés mécaniques, thermiques et diélectriques des composites à matrice PVC chargée avec la fibre de grignon d'olive, modifiée chimiquement par benzylation a montré une amélioration de l'allongement et de la contrainte à la rupture pour les composites traités ce qui est due probablement au caractère thermoplastique de la FGO après benzylation, par conséquent une bonne adhérence interfaciale. Un gain de 12°C dans la température de début de décomposition est enregistré pour les composites traités (F25B) par rapport à ceux non traités (F25), une perte diélectrique moins importante est enregistrée pour les composites traités (F25B), dans l'intervalle (0 à 70°C). La diminution de la concentration des hydroxyles après traitement, a été mise en évidence par l'analyse IRTF, indiquant clairement que la réaction de mono substitution des ions de sodium par des groupements benzyliques a vraiment eu lieu.

S. Perinovic et al [21] sont intéressés aux composites biodégradables de poly (L-lactique) (PLLA) renforcés par la farine de grignon d'olive (FGO).

L'ajout de FGO a influencé sur la forme cristallographique et la morphologie de la matrice de PLLA ainsi que sur le degré de cristallinité. Les fibres de grignon d'olive OSF agissent comme un agent de nucléation à des concentrations plus faibles, mais aussi un obstacle pour les chaînes de polymère.

Le renforcement de la matrice de PLLA par la FGO a un effet négligeable sur la transition vitreuse du PLLA, due à la faible adhérence interfaciale entre fibre-matrice. Les vides et les agglomérats de la charge sont plus visibles avec l'augmentation du taux de renforcement. L'analyse thermogravimétrique TG des composites à plusieurs vitesses de chauffage montre que l'addition de FGO détériore la stabilité thermique de PLLA déplaçant le début de la dégradation thermique à des températures plus basses. L'addition d'OSF élargit également la région de la dégradation de PLLA et diminue la vitesse de dégradation. Pour des taux de charge plus de 20% en poids pas d'influence importante sur les propriétés de dégradation de PLLA.

I. Naghmouchi et al [22] Le but de son travail est la possibilité d'utiliser la farine de grignon d'olive (FGO) comme charge pour le polychlorure de vinyle (PVC), avec une teneur de charge jusqu'à 50% en poids. Les matériaux composites PVC-FGO obtenues présentent une

plus grande rigidité que le PVC pur, l'ajout de FGO réduit la résistance mécanique et les propriétés d'impact des composites. Par exemple, à 40% de charge, la résistance à la traction et la résistance au choc ont été réduites d'environ 30% et 80%, respectivement, par rapport à la matrice PVC pur. Les composites PVC-FGO pourront être utilisés dans plusieurs applications, telles que la construction, l'industrie automobile, ainsi que dans le jardinage.

D. Bachtiar et al [23] ont étudié l'effet du traitement alcalin et l'ajout d'un agent de compatibilisation dans la stabilité thermique des composites à base de polystyrène PS renforcés par des fibres de palmier à sucre. Le traitement alcalin est effectué par trempage des fibres dans 4 et 6% de solution de NaOH, tandis que le traitement avec l'agent de compatibilisation a été employé en ajoutant 2 à 3% de polystyrène greffé d'anhydride maléique (PS-g-AM). D'après l'étude, la stabilité thermique des composites avec des fibres traitées avec un traitement alcalin et un agent de compatibilisation est meilleure par rapport à celle des composites avec des fibres non traitées. Cela montre que les traitements ont également contribué à l'évolution de la température maximale de la dégradation des composites. En d'autres termes, il existe de fortes interactions chimiques entre le polystyrène et les fibres traitées.

Pal et al [24] ont étudié l'effet du renforcement des fibres de sisal et de chanvre, seules ou simultanées, dans une matrice polymère, contenant un mélange 50-50 de PEHD vierge et recyclé, sur le comportement à la traction. Avant la fabrication du composite, les fibres ont été traitées chimiquement avec du NaOH et de l'anhydride maléique (agent de couplage). Ils ont observé que la résistance à la traction des composites hybrides fibres de chanvre-sisal / PEHD est supérieure aux composites PEHD renforcés de fibre unique (chanvre / sisal). La comparaison des résistances à la traction de divers spécimens, montre que la résistance à la traction d'un composite hybride avec 5% de sisal et 20% de fibres de chanvre est 23,49% plus élevée que celle avec 30% de composite de fibres de chanvre. Lors de l'augmentation de la quantité de fibre de sisal de 5% à 20% dans un composite hybride, la résistance à la traction est encore augmentée. Avec 20% de sisal et 5% de fibres de chanvre la résistance à la traction maximale est de 19,23 MPa, soit 51,06% plus que la résistance à la traction avec 30% en poids de fibres de chanvre seules. Lorsque la teneur en fibre de sisal dans un échantillon hybride augmente de 5% à 20%, la résistance à la traction du composite hybride augmente de 22,33%. D'après la **Figure II.3**, il est évident que le composite hybride (échantillon-C) a une résistance à la traction plus élevée que n'importe lequel des composites à fibre unique (sisal /

chanvre) (échantillons-A & E). Il est observé qu'en remplaçant 15% de chanvre par 15% de sisal dans 30% de composite de fibres de chanvre (échantillon -A), tout en gardant le même rapport fibre-matrice, la résistance à la traction augmente de 47%, comme le montre la comparaison d'échantillon -A et d'échantillon -C. De même, en remplaçant 15% de sisal par 15% de chanvre dans un composite de fibres de sisal à 30% (échantillon-E), la résistance à la traction augmente à nouveau de 56%. Ainsi, un effet positif de l'hybridation est observé sur la résistance à la traction à 30% de charge de fibre, et l'incorporation de fibres de chanvre dans un composite de fibres de sisal conduit également à une augmentation substantielle de la résistance à la traction. Par exemple, la résistance avec 20% de sisal et 5% de chanvre, est supérieure d'environ 60% à la résistance à la traction d'échantillon -E ayant 30% de fibre de sisal seule. Mais lors de l'augmentation de la teneur en fibres de chanvre de 5% à 20% dans un composite hybride, la résistance à la traction diminue de 18,25%. Ainsi, la fibre de sisal semble être l'agent de renforcement principal et domine la fibre de chanvre pour contrôler la résistance à la traction des composites hybrides.

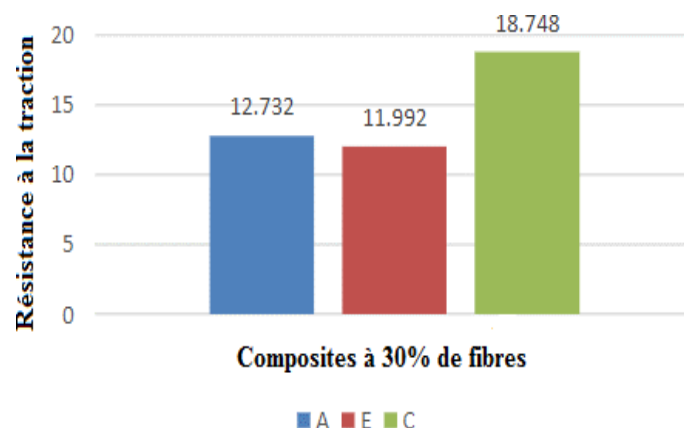


Figure II.3 : Comparaison de la résistance à la traction de composites hybrides avec des composites à fibre unique (sisal / chanvre) à 30% de charge de fibre.

Perez-Fonseca et al [25] Ont étudié les composites hybrides de polyéthylène haute densité / agave - coco avec deux teneurs en fibres (20 et 30 % en poids) et différents rapports de fibres coco-agave (1-0, 0,8-0,2, 0,6-0,4, 0,4-0,6, 0,2-0,8 et 0-1) ont été produits dans un processus en deux étapes utilisant l'extrusion à deux vis suivie d'un moulage par injection. L'effet du mélange de deux fibres naturelles différentes et de l'ajout d'un agent de couplage polyéthylène malaté (PE-g-MA) sur l'absorption d'eau, les propriétés mécaniques et la morphologie ont été rapportés. Les résultats obtenus ont montré que la combinaison de différentes fibres produit

des composites aux caractéristiques uniques. Qu'en utilisant uniquement des fibres d'agave, la résistance à la traction diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres. Ceci est lié à une mauvaise adhérence interfaciale entre les fibres d'agave (hautement hydrophiles) et la matrice polymère. Les composites hybrides préparés avec des fibres d'agave et de coco sans PE-g-MA ont montré que pour une teneur en fibres de 20%, la résistance à la traction maximale était atteinte avec des teneurs en agave plus élevées (22 MPa), mais dans le cas d'une teneur en fibres de 30%, la résistance à la traction était plus élevée avec des teneurs en coco plus élevées parce que le maximum était atteint pour les composites utilisant uniquement des fibres de coco (23 MPa), et la résistance à la traction était inférieure à celle du PEHD pur (28 MPa). De plus, il a été constaté que l'ajout d' PE-g-MA augmentait la résistance à la traction : 16% (26 MPa) et 19% (25 MPa) pour les composites utilisant des fibres de coco ou d'agave, respectivement. Les résultats du module de traction étaient très similaires pour tous les composites hybrides préparés avec et sans PE-g-MA (environ 400 et 500 MPa pour 20 et 30% de fibres) avant l'absorption d'eau. Mais après l'absorption d'eau, les composites contenant du PE-g-MA ont conservé leurs valeurs de module, tandis que des diminutions ont été observées sans PE-g-MA. La résistance à la flexion sans l' PE-g-MA était très similaire pour les composites hybrides : environ 24 et 29 MPa pour une teneur en fibres de 20 % et 30 % respectivement (plus de 22 MPa pour le PEHD pur). Les composites hybrides préparés avec un agent de couplage ont montré que l'ajout de PE-g-MA augmentait la résistance à la flexion (6-12%), le maximum étant atteint pour les composites PEHD - coco à 30% (32 MPa), les fibres d'agave et de coco ont des dimensions et une composition chimique différentes, ce qui explique pourquoi les propriétés du coco ont été davantage améliorées par l'ajout de PE-g- MA. Les composites à base d'agave sont plus susceptibles d'absorber de l'eau. L'ajout de coco aux composites à base d'agave a contribué à prévenir cette perte de propriété après l'absorption d'eau. Dans tous les cas, la réduction de la résistance à la flexion (environ 5 %) des composites à base d'agave a été la même pour toutes les combinaisons hybrides. les valeurs de module de flexion sont très similaires pour toutes les combinaisons hybrides, mais varient en fonction de la teneur en fibres (566 MPa pour le PEHD pur, 900 MPa à 20 % et 1100 MPa à 30 %). On peut observer que la teneur en fibres est un paramètre important lié à l'absorption d'eau. L'ajout d' PE-g-MA a eu un effet positif sur le module de flexion en réduisant l'effet de l'absorption d'eau. Les résultats de la résistance aux chocs montrent l'hybridation de composites de coco avec des fibres d'agave produisant des composites ayant une meilleure résistance à l'impact. Par exemple, une combinaison 40 à 60 % (fibres d'agave et de coco) a augmenté cette propriété (par rapport au coco seul) jusqu'à 18 % (de 37 à 44

J/m) sans l' PE-g-MA et jusqu'à 10 % (de 45 à 49 J/m) avec l' PE-g-MA. De plus, après absorption d'eau, la résistance à l'impact des composites hybrides a considérablement augmenté, le maximum obtenu étant pour les composites à 30 % de fibre d'agave seule et d' PE-g-MA après immersion dans l'eau (73 J/m). Enfin il a conclu qu'une combinaison de fibres de coco et d'agave dans le PEHD est une bonne option pour produire des composites hybrides ayant de meilleures propriétés que ceux utilisant uniquement des fibres de coco ou d'agave. Alors que les fibres d'agave améliorent la résistance aux chocs, les fibres de coco améliorent la résistance à la flexion et à la traction et réduisent l'absorption d'eau. Les propriétés des composites avec les deux fibres ont également été améliorées par l'ajout d'un agent de couplage (PEMA), ce qui permet d'obtenir des matériaux ayant une plus grande résistance à l'impact, à la traction et à la flexion. En général, les propriétés de traction et de flexion des composites ont diminué après l'absorption d'humidité en raison de l'effet des molécules d'eau qui modifient la structure et les propriétés des fibres, de la matrice et surtout de leur interface. L'ajout d' PE-g-MA a également contribué à diminuer l'absorption d'eau, limitant ainsi la dégradation des composites lorsqu'ils sont exposés à l'eau. D'autre part, la résistance aux chocs a été augmentée après l'absorption d'eau pour tous les composites hybrides car le gonflement des fibres a rendu plus difficile leur extraction de la matrice.

Zainudin et al [26] Ont étudié l'effet de l'hybridation de fibres de coco et de palmier à huile sur les propriétés mécaniques des composites à matrice polypropylène. La microscopie électronique à balayage (MEB) a été utilisée pour étudier la morphologie de la surface de rupture en traction des composites hybrides. Il a été constaté que les propriétés de flexion et de traction des composites de palmier à huile/PP ont été améliorées avec l'hybridation de fibres de coco dans un rapport de (25:75). Tandis que les propriétés d'impact les plus élevées ont été obtenues avec des fibres de coco et de palmier à huile dans un rapport de 50:50. Ainsi, les composites hybrides d'une concentration massique en pourcentage 50:50 ont présenté des propriétés mécaniques optimales. Il ressort clairement de la micrographie au MEB que les composites hybrides de coco / palmier à huile (50:50) présentent de meilleures propriétés de traction grâce à une forte liaison fibre/matrice par rapport à d'autres formulations qui conduisent à une répartition uniforme et efficace des contraintes entre les fibres.

Sathishkumar et al [27] Ont évalué les caractéristiques mécaniques des composites hybrides polyester renforcés de sisal / fibre de coton. La résistance à la traction, la résistance à la flexion et la résistance à l'impact ainsi que le module de traction de ces composites étaient au maximum à 40% Vf de fibre dans les deux sens. Ceci est dû à la cohésion des forces exercées

entre les matrices adjacentes. Lors de la phase d'essai des propriétés de traction, les fibres de sisal ont été plus cisailées que les fibres de coton dans les composites.

Tableau II.1 : Propriétés mécaniques des composites de polyester hybrides.

Fraction volumique des fibres (%)	Direction des Fibres	Résistance à la traction (MPa)	Résistance à la flexion (MPa)
10	Sisal	30 ,22	74,59
10	Coton	24,5	60,61
40	Sisal	63,55	270 ; 4
40	Coton	53,45	237,61
50	Sisal	42,45	230,45
50	Coton	36,45	186,5

Sarasini et al [28] Ont développé un composite hybride biodégradable à base de polycaprolactone (PCL) renforcé par des fibres de ramie et de borasse (rônier). L'inclusion de fibres de ramie dans la matrice du PCL a permis d'augmenter la résistance à la traction et le module. D'autres augmentations de la résistance à la traction et du module ont été observées lorsque la teneur en fibres de ramie a été augmentée. Le comportement à la traction de la matrice pure a été considérablement amélioré par l'introduction des deux fibres. En outre, la ductilité et la résistance différentes des fibres de borasse et de ramie ont été exploitées dans des formulations hybrides, confirmant la possibilité d'adapter les propriétés des composites qui en résultent à une application spécifique.

Shekeil et al [29] Ont produit des composites de polyuréthane thermoplastique renforcé par les fibres de kénaf, ils ont observé une augmentation de la résistance à la traction de composite avec une augmentation de la charge de fibres jusqu'à 30%, puis elle diminue en augmentant la teneur en fibre, ce qui conduit à la formation des agglomérats en résultant un mouillage insuffisant des fibres avec la matrice.

Julson et al [30] Ont trouvé qu'une augmentation de taux de fibre de bois de 20% à 30% présentée dans le polyéthylène, fait augmenter les modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR) en flexion et en traction à environ 38%.

Soykeabkaew et al [31] Utilisaient des fibres de lin non traitées pour renforcer les mousses d'amidon. L'addition de 5% à 10% en poids des fibres a entraîné une amélioration de la résistance à la flexion et du module d'élasticité.

George et al [32] Ont étudié la relation entre l'absorption d'humidité des composites de polyéthylène basse densité (LDPE) renforcés de fibres de feuilles d'ananas avec différentes charges de fibres. Ils ont constaté que l'absorption d'humidité augmente presque linéairement avec l'augmentation du taux en fibres.

Stark [33] a étudié l'influence de taux d'adsorption d'eau sur les propriétés mécaniques des composites bois/ polypropylène (PP). Il a constaté que les composites chargés avec 20% de farine de bois en poids et émergés dans un bain d'eau, ont atteint un équilibre d'adsorption après 1500 h et ils ont absorbé seulement 1,4% d'humidité, tandis que les composites chargés avec 40% de farine, ont atteint un équilibre d'adsorption après 1200 heures d'immersion dans l'eau et ils ont absorbé environ 9,0% d'humidité. Après l'analyse, elle a conclu que la farine de bois est inhibée par l'absorption d'humidité due à l'encapsulation de la farine de bois par la matrice de PP et que le degré d'encapsulation est plus grand pour les composites chargés avec 20% de la farine de bois que pour les composites chargé avec 40% de farine de bois.

Balatinecz et Park [34] en 1997 ont étudié les effets de l'humidité sur les propriétés mécaniques des composite thermoplastique/fibre de bois et ont constaté que l'absorption d'eau cause la diminution de la résistance à la traction et en flexion, mais cause aussi une augmentation de la résistance au choc.

Yildiz et al [35] Ont suggéré que les températures supérieures à 150°C peuvent entraîner des altérations permanentes des propriétés physiques et chimiques des fibres lignocellulosiques telles que le bois. Il est également indiqué que les traitements thermiques à haute température peuvent améliorer la durabilité biologique du bois, mais la rigidité et la résistance sont réduites.

Benyahia et al [36] ont traité les fibres d'alfa par une solution de NaOH avec 1%, 3%, 5% et 7% durant 24h. Les résultats obtenus montrent que la résistance à la traction et la résistance à la flexion des composites à fibres traitées avec 7% de NaOH s'améliorent de l'ordre de 30% et 50% respectivement ; comparant aux composites polyesters renforcés par des fibres d'alfa non traitées.

Mohanty et al [37] ont étudié l'effet de traitement alcalin sur les propriétés mécaniques des composites en polyester renforcé par la fibre de sisal. Ils ont remarqué que le traitement à 5% de NaOH donne une meilleure résistance mécanique par rapport à 10% de NaOH. Ceci est dû à l'augmentation de la concentration de NaOH, qui peut être néfaste et entraîne la fragilisation des fibres ; ce qui influe sur les propriétés mécaniques des composites.

J. P. Siregar et al [38] ont étudié l'effet du traitement alcalin des fibres de feuilles d'ananas sur les propriétés mécaniques des composites à base de polystyrène (PS) en utilisant une solution de NaOH à 2% et 4%. D'après leurs résultats, ils ont remarqué une augmentation des propriétés mécaniques des composites telles que la résistance à la traction, le module à la traction, la résistance à la flexion, le module de flexion et la dureté avec une concentration de 4% de NaOH.

Cui et al, 2008 [39] ont étudié aussi l'effet de l'augmentation du pourcentage et de la longueur de la fibre de bois sur le WPC (wood plastic composite) en flexion, ils ont trouvé que le module à l'élasticité en flexion croît avec l'augmentation de la taille des fibres tandis que la résistance à la flexion et au choc diminue.

Références Bibliographiques

- [1] J. W. Kim, D. P. Harper, A. M. Taylor, « Effect of wood species on the mechanical and thermal properties of wood plastic composites », *J. App. Polym. Sci*, 112, 1378-1385 (2009).
- [2] H. S. Yang, M. P. Wolcott, H. S. Kim, S. Kim, H. J. Kim, « Properties of lignocellulosic material filled PP biocomposites made with different manufacturing processes », *Polym Testing*, 25, 668-676 (2006).
- [3] A. K. Bledzki, M. Letman, A. Viksne, L. Rence, « A comparison of compounding processes and wood type for wood fiber-PP composites », *Compos, Part A*, 36, 789-797 (2005).
- [4] K. L. Yam, B. K. Gogoi, C. C. Lai, S. E. Selke, « Composites from compounding wood fibers with recycled high density polyethylene », *Poly. Eng. Sci*, 30, 693-699 (1990).
- [5] S. J. Kim, J. B. Moon, G. H. Kim, C. S. Ha, « Mechanical properties of polypropylene/natural fiber composites, comparison of wood fiber and cotton fiber », *Polym. Testing*, 27, 801-806 (2008).
- [6] Carla V., Andreia S.F., Carmen F.S.R., Armando S.J.D., Carlos P.N., « Novel sustainable composites prepared from cork residues and biopolymers », *Biomass and Bioenergy* 55, 148-155 (2013).
- [7] J. Julson, L. Subbarao, G. Stokke, D. D. Gieselman, « Mechanical Properties of Biorenewable Fiber/Plastic Composites », *J. App. Poly. Sci*, 93, 2484-2493 (2004).
- [8] N.M. Stark, R. E. Rowlands, « Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites », *Wood and fiber science*, 35, 167-174 (2003).
- [9] T. T. L. Doan and all, « Jute/PP composites, Effect of matrix modification », *Compos. Sci. Tech*, 66, 952-963 (2006).
- [10] S. M. Sapuan, D. Bachtar, « Mechanical Properties of Sugar Palm Fibre Reinforced High Impact Polystyrene Composites », *Procedia Chemistry*, 4, 101-106 (2012).
- [11] S. Mishra, J. B. Naik, « Effect of Treatment of Maleic Anhydride on Mechanical Properties of Natural Fiber: Polystyrene Composites », *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 44 (2005).
- [12] Mirbagheri J, Mehdi T, John C. H, Ismaeil G. « Tensile properties of wood flour/ kénaf fiber polypropylene hybrid composites », *Journal of Applied Polymer Science*, 105(5), 3054-3059, 663-675.

- [13] Alavudeen A, Rajini N, Karthikeyan S, Thiruchitrabalam M, Venkateshwaren N, « Mechanical properties of banana/kenaf fiber-reinforced hybrid polyester composites : Effect of woven fabric and random orientation », *Materials & Design*, 66, 246–257, (2007).
- [14] A. C. Karmaker, J. A. Youngquist, « Injection Molding of Polypropylene Reinforced with Short Jute Fibers », *Journal of Applied Polymer Science*, 62, 1147-1151, (1996).
- [15] A. C. Karmaker, « Effect of water absorption on dimensional stability and impact energy of jute fibre reinforced polypropylene », *Journal of materials science letters*, 16, 462-464 (1997).
- [16] M. Khalid, L. S. Ali1, L. C. Abdullah, C. T. Ratnam, S. Y. Thomas Choong, « Effect of MAPP as coupling agent on the mechanical properties of palm fiber empty fruit bunch and cellulose polypropylene biocomposites », *International Journal of Engineering and Technology*, 3, 79-84,(2006).
- [17] D.T.T. Loan, « Investigation on jute fibres and their composites based on polypropylene and epoxy matrices », Thèse de doctorat, Université de Dresden (2006).
- [18] D. Bachtiar, S. M. Sapuan, A. Khalina, E. S. Zainudin, K. Z. M. Dahlan, « Flexural and impact properties of chemically treated sugar palm fiber reinforced high impact polystyrene composites », *Fibers and Polymers*, 13, 894–898 (2012).
- [19] J. P. Siregar, S. M. Sapuan, M. Z. A. Rahman, H. M. D. K. Zaman, « The effect of alkali treatment on the mechanical properties of short pineapple leaf fibre (PALF) reinforced high impact polystyrene (HIPS) composites », *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8, 1103–1108 (2010).
- [20] H. Djidjelli, D. Benachour, A. Boukerrou, O. Zefouni, J. Martinez-Véga, J. Farenc, M. Kaci, « Thermal, dielectric and mechanical study of poly (vinyl chloride)/olive pomace composites », *Express Polymère Lettres*, 1, 846–852 (2007).
- [21] S. Perinović, B. Andrić, M. Erceg, « properties of poly (l-lactide)/olive stone flour composites », *Thermochimica Acta*, 5, 97–102 (2010).
- [22] I. Naghmouchi, P. Mutjé, S. Boufi, « Polyvinyl chloride composites filled with olive stone flour: Mechanical, thermal, and water absorption properties », *Journal of Applied Polymer Science*, 131, 41083 (2014).
- [23] D. Bachtiar, S. M. Sapuan, E. S. Zainudin, A. Khalina, K. Z. H. M. Dahlan, « Thermal properties of alkali-treated sugar palm fibre reinforced high impact polystyrene composites », *Pertanika Journal of Science and Technology*, 21, 141–150 (2013).
- [24] Pal N, Aggarwal L, Gupta VK. « Tensile behavior of sisal/hemp reinforced high density polyethylene hybrid composite ». *Materials Today: Proceedings*, 2, 3140-3148 (2015).

- [25] Perez-Fonseca AA, Arellano M, Rodrigue D, Gonzalez-Nunez R, Robledo-Ortiz JR. « Effect of coupling agent content and water absorption on the mechanical properties of coir-agave fibers reinforced polyethylene hybrid composites ». *Materials and Design* 64, 35– 43 (2014).
- [26] Zainudin ES, Yan L H, Haniffah Wh, et al, « Effect of coir fiber loading on mechanical and morphological properties of oil palm fibers reinforced polypropylene composites», *Journal of Polymers and Polymer Composites*, 35, 1418-1425 (2014).
- [27] TP Sathishkumar, J Naveen, P Navaneethakrishnan, S Satheeskumar and N Rajini, « Characterization of sisal/cotton fiber woven mat reinforced polymer hybrid composites », *Journal of Industrial Textiles*, 47, 1–24 (2016).
- [28] Sarasini F, Tirillò J, Puglia D, Dominici F, Santulli C, Boimau K, and Valente T, Torre L, « Biodegradable poly – caprolactone based composites reinforced with ramie and borassus fibers », *Composite Structures*, 167, 20–29 (2017).
- [29] El-Shekeil Y.A., Sapuan S.M., & Algrafi M.W., « Effect of fiber loading on mechanical and morphological properties of cocoa pod husk fibers reinforced thermoplastic polyurethane composites », *Materials & Design*, 64, p, 330-333 (2014).
- [30] Julson J.L., Subbarao G., Stokke D.D., et Gieselman H.H, « Mechanical Properties of Biorenewable Fiber/Plastic Composites », *Journal of Applied Polymer Science*, 93, p, 2484-2493 (2004).
- [31] Soykeabkaew N., Supaphol P., Rujiravanit R., « Preparation and characterization of jute- and flax-reinforced starch-based composite foams », *Carbohydrate Polymers*, 58, p 53–63 (2004).
- [32] George J., Bhagawan S.S., & Thomas S, « Effects of environment on the properties of low-density polyethylene composites reinforced with pineapple-leaf fibre », *Composites Science and Technology*, 58(9), p, 1471-1485 (1998).
- [33] Stark N, « Influence of moisture absorption on mechanical properties of wood flour-polypropylene composites », *Journal of thermoplastic composite materials*, 14(5), p. 421-432 (2001).
- [34] Balatincez J.J., Park B.D, « Effects of temperature and moisture exposure on the properties of wood-fiber thermoplastic composites », *J. Thermoplast, Compos, Mater*, 10, p, 476-487 (1997).
- [35] Yildiz S., Gezer E.D., & Yildiz U.C, « Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat », *Building and Environment*, 41(12), p. 1762-1766 (2006).

- [36] Benyahia A., Merrouche A., Rahmouni Z.E.A., Rokbi M., Serge W., Kouadri Z, « Study of the alkali treatment effect on the mechanical behavior of the composite unsaturated polyester-Alfa fibers », *Mechanics & Industry* 15, 69-73 (2014).
- [37] Mohanty A. K., Misra M., Drzal L. T, « Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites », *An overview. Composite Interfaces*, Vol. 8, No. 5, 313-343 (2001).
- [38] Siregar J. P., Sapuan S. M., Rahman M. Z. A., Zaman H. M. D. K, « The effect of alkali treatment on the mechanical properties of short pineapple leaf fibre (PALF) reinforced high impact polystyrene (HIPS) composites », *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8, 1103-1108 (2010).
- [39] Cui Y, Lee S, Noruziaan B, Cheung M, Tao J, « Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39 (4), 655-661 (2008).

Chapitre III
Matériaux et techniques
Expérimentales

Chapitre III Matériaux et techniques expérimentales

Le présent chapitre résume les travaux effectués dans le laboratoire CP2K pour étudier les propriétés physiques, mécaniques, et morphologiques des composites de fibres de lièges, et fibres de bois et la matrice thermoplastique du PEHD grade 5502.

La préparation des matériaux passe par les étapes illustrées dans le schéma présenté ci-dessous.

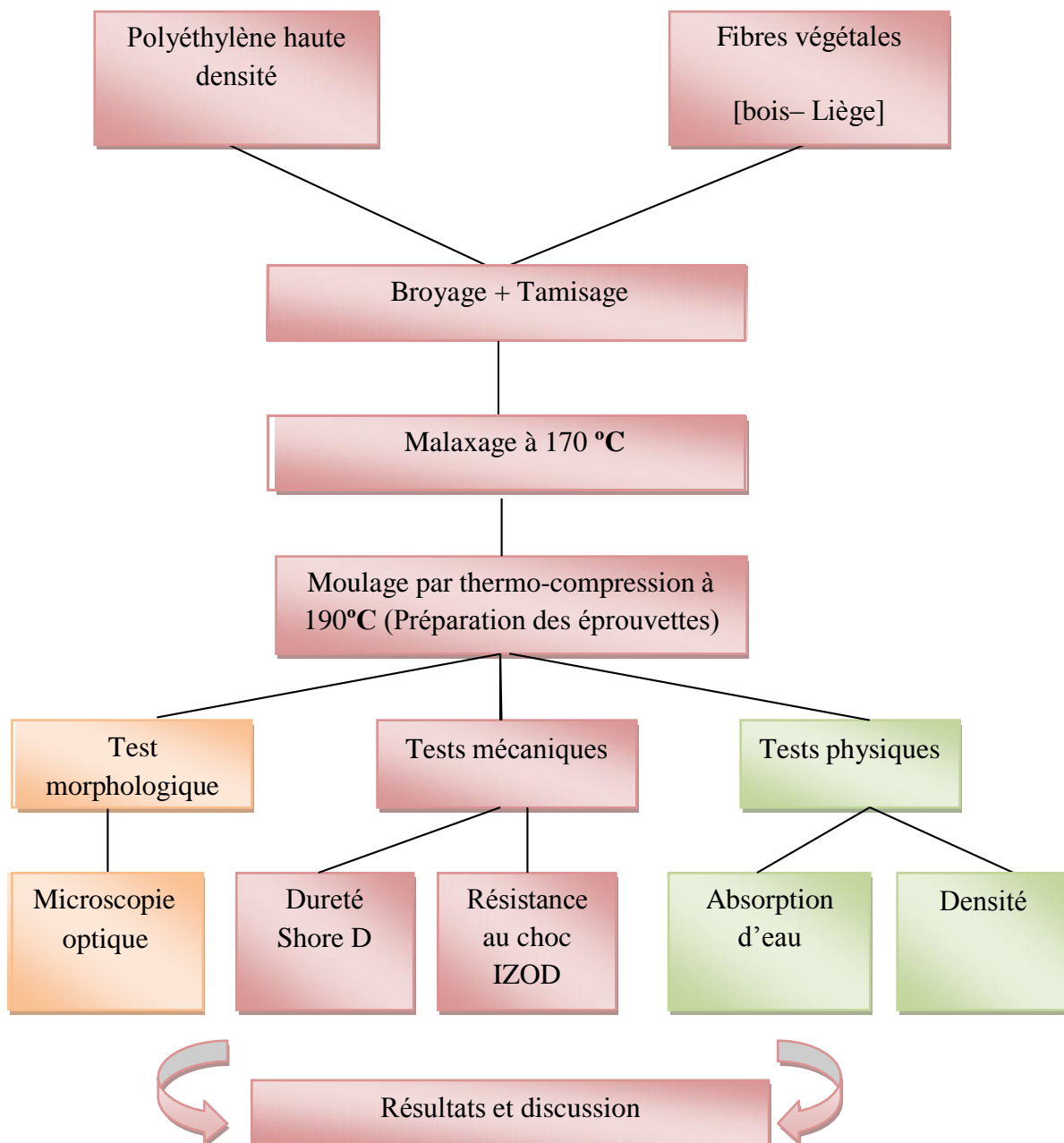


Figure III.1 : les différentes étapes d'élaboration et caractérisation de matériaux.

Bio composites PEHD/Charge.

III.2. Produits et matériaux utilisés

Dans ce travail lors de l'élaboration des différents types de bio composites on a utilisé comme matrice le PEHD grade 5502 et comme renfort des fibres végétales qui sont issues de liège et de bois.

III.2.1. La matrice

III.2.1.1. Polyéthylène haute densité (PEHD)

La matrice utilisée est le polyéthylène haute densité (PEHD grade 5502), produit par la complexe CP2K sous forme des poudres d'une couleur blanche, comme l'indique la (**Figure III.2**).



Figure III.2 : PEHD 5502 sous forme d'une poudre.

Ses principales caractéristiques sont données sur le tableau suivant :

Tableau III.1 : Principales caractéristiques du PEHD 5502.

Propriétés	Méthodes	Unité	Valeur
Indice de fluidité (2,16 Kg / 190 °C)	ASTM D1238	g/10 min	0,27- 0,43
Densité (23 °C)	ASTM D1505	g/cm ³	0,9540-0,9580
Résistance à la traction	ASTM D638	MPA	20-30
Module de flexion	ASTM D790	MPA	1000-1500
Conductivité thermique	ASTM D5930	W/mk	0,38-0,58
Température de transition vitreuse T _g	-	C	-125
Température de fusion T _f	-	C	135

III.2.2. Charges utilisées

III.2.2.1. Farine de bois

Dans cette étude, la farine de bois utilisée comme la première charge naturelle est issue de l'arbre de *Pin d'Alep*, originaire de la wilaya de Djelfa. La farine du bois est récupérée d'une chaîne de transformation de bois, au niveau de l'entreprise nationale de

transformation de bois «*Transbois*», située à l'arrière port de Béjaia. Les troncs d'arbres utilisés ont été dénudés de la couche morte extérieure. Ensuite broyés par deux broyeurs de types « BROUKS » et « PALMAN ». A la sortie de ces broyeurs, une farine très fine est récupérée.

III.2.2.2. Poudre de liège

Dans cette étude, la farine de liège utilisée comme deuxième charge naturelle est issue de l'arbre de chêne, originaire de la wilaya de Skikda. La farine de liège est récupérée d'une chaîne de transformation de liège, au niveau d'une petite institution pour écraser le liège, située à Collo de wilaya de Skikda. L'écorce de chêne est enlevée et stockée pour sécher, ensuite broyés par moulins personnalisés, une farine très fine est récupérée.

III.2.2.3. Tamisage

Celle-ci a subi une analyse granulométrique au niveau du laboratoire de Génie Civil, à l'Université de Skikda, en utilisant une tamiseuse automatique de type AS200 BASIC pendant 15 min, pour sélectionner les fractions de les farines (Bois, Liège) appartenant à la gamme 90 μ m.



A : Farine de liège



B : Farine de bois



C : Tamiseuse automatique

Figure III.3 : Préparation et tamisage des charges.

III.3. Techniques expérimentales

III.3.1. Préparation des différents composites

La préparation des matériaux composites, est une étape très importante. Le procédé et les paramètres de mise en œuvre conditionnent les propriétés finales du matériau. La technique utilisée dans ce travail est le malaxage à l'aide d'un malaxeur à deux cylindres suivi par le moulage thermo compression.

Dans cette étude, nous avons préparé plusieurs formulations à base de polyéthylène haute densité comme matrice thermoplastique renforcé par des charges végétales : la farine de liège et la farine de bois.

La composition massique de différentes formulations élaborées est représentée sur le **Tableau III.2**.

Tableau III.2 : Composition des différentes formulations.

Compositions	PEHD(%)	Farine de Liège(%)	Farine de bois(%)
PEHD	100	0	0
PEHD/Farine de bois	80	20	0
PEHD/Farine de Liège	80	0	20
PEHD/Farine de Liège/Farine de Bois	80	10	10

III.4. Malaxage

Dans un malaxeur thermocinétique (voir la **Figure III.4**) l'opération de mélangeage s'est faite à 170 °C selon les étapes suivantes :

Quand la température des 2 cylindres atteint 170 °C, les composites PEHD / Bois, PEHD/ Liège, (PEHD/Bois /Liège), est versé entre les deux cylindres de marque IQAP LAP, RLS- 110 à l'unité « CP2K ».A surface lisse tournant en sens inverse avec une vitesse de rotation de 32 tr/min, après un temps de 8 min il fond est devient comme une plaque de pâte (**Figure III.5**). Le mélange est ramené de temps à autre entre l'interfère, et au moyen d'un cutter on procède à l'extraction de la feuille collée sur le cylindre, ensuit le refroidissement de cette feuille à l'air libre. À la fin, la feuille est découpée en petits morceaux.



Figure III.4. : Mélangeur à deux cylindres de marque IQAP LAP –RLS-110.



Figure III.5 : Préparation des composites PEHD/Charges.

III.5. La thermo- compression

III.5.1. Préparation des éprouvettes

Cette méthode a été utilisée pour produire des différentes éprouvettes de 3 mm d'épaisseur à l'aide d'une presse hydraulique de thermo-compression à plateaux, utilisée pour la préparation des éprouvettes qui sont destinées aux essais mécaniques (Résistance au choc IZOD et Dureté Shore D), physiques (densité, absorption d'eau), et morphologique (microscopie optique).

Le mélange PEHD/Charges préparés est placé en excès dans le moule entre deux feuilles de téflon isolant intercalées entre deux plaques métalliques d'une presse de marque CARVER (**Figure III.6**), et pressée thermiquement dans une température 190 °C, pendant un temps de séjour de 15 min, et à chaque 3 min qu'on fait du dégazage.

Cette procédure nous permet de donner des différentes éprouvettes, pour servir dans les différents tests de caractérisation.



Figure III.6 : Presse hydraulique.

III.6. Techniques de caractérisation des matériaux élaborés

Cette partie décrit les différentes techniques utilisées pour la caractérisation physique, mécanique et morphologique des matériaux composites élaborés.

III.6.1. Tests physiques

III.6.1.1. La densité

La densité apparente est mesurée par la méthode pycnométrique, selon la norme NFT51-063. L'eau distillée est le solvant de déplacement utilisé qui assure une bonne mouillabilité de l'échantillon.



Figure III.7 : Pycnomètre utilisé pour déterminer la densité.

Pour la détermination de la densité, on a utilisé la méthode pycnométrique, selon la norme NFT 51-063, exprimée par la relation (III.1) :

$$d = \frac{\rho (M2 - M1)}{(M4 - M1) - (M3 - M2)} \quad \text{III.1}$$

Avec :

ρ : Densité du liquide de déplacement ;

M1 : Poids du pycnomètre à vide ;

M2 : Poids du pycnomètre contenant la prise d'essai ;

M3 : Poids du pycnomètre contenant la prise d'essai et le liquide ;

M4 : Poids du pycnomètre contenant le liquide de déplacement.

III.6.1.2. Test d'absorption d'eau

Cet essai a pour but de déterminer le taux d'absorption d'eau par le matériau, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon.

Le test est réalisé dans le laboratoire de Département de Génie des procédés (université de Skikda), pour des échantillons de 3 mm d'épaisseur. Les spécimens sont immergés dans l'eau distillée et à température de laboratoire de 27° C. Avant l'immersion, les spécimens ont été étuvés pendant 24h à 50°C ensuite refroidis, puis pesés immédiatement (m_0).

Un suivi périodique de la variation du poids est réalisé (m_t) et avant chaque pesée, l'eau superficielle en excès est éliminée en essuyant l'échantillon avec du papier absorbant.

Le taux d'absorption d'eau est déterminé par la relation suivante :

$$\Delta m (\%) = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100 \quad \text{III.2}$$

Avec : m_0 : La masse des échantillons avant immersion

m_t : La masse des échantillons après immersion.

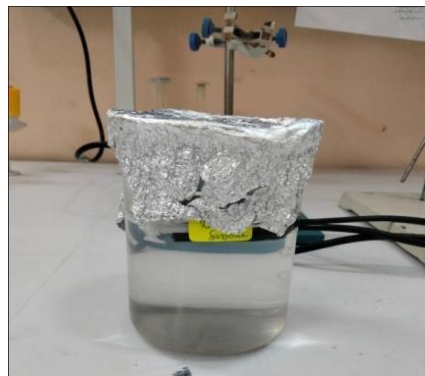


Figure III.8 : Les échantillons immergés dans l'eau distillée.

III.6.2. Tests mécaniques

III.6.2.1. Dureté Shore D

C'est une propriété complexe à mesurer qui exprime la résistance à la déformation. Elle est déterminée selon des méthodes légèrement modifiées initialement employées dans les essais des métaux, les normes applicables étant les normes ASTM D785 – 51 et ASTM D 2240.

Le principe de ces essais est la mesure de l'entaille provoquée par l'application d'une bille en acier ou d'un cône en diamant sous une charge standard. Des dispositifs de pénétration de tailles différentes sont employés pour les différentes gammes de dureté.

Dans une première approche, on peut relier de manière assez simple la limite d'élasticité R_e avec la surface de l'empreinte : plus l'objet pénétrant s'enfonce, plus la surface S de pression s'agrandit, donc la force F étant constante, plus la contrainte diminue. Lorsque la contrainte n'est plus suffisante pour déformer plastiquement le solide à tester, l'objet pénétrant s'arrête, et on a donc :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

III.3

- **Protocole expérimental :**

Selon la norme ASTM D-2240 les échantillons en plaque de 3 mm d'épaisseur sont préparés à l'aide de la presse, puis placés sous l'aiguille. En agissant sur le bras du levier jusqu'à pénétration de l'aiguille on peut lire la valeur indiquée par celle-ci.

Trois essais sont réalisés en différents points, puis la moyenne est calculée.



Figure III.9 : Appareillage de mesure de la dureté Shore D.

III.6.2.2. Résistance au choc IZOD

La résistance au choc caractérise l'énergie absorbée au cours de la rupture d'une éprouvette préalablement entaillée (en V pour la méthode IZOD). L'essai se réalise sur une machine appelée mouton-pendule rotatif. La résilience s'exprime par unité de largeur (J/m), ou résilience transversale en (J/m²) ou la résilience volumique en (J/m³).

Chaque appareil est équipé de plusieurs pendules (marteaux) interchangeables de 0.5 à 50 J. Cet essai implique l'utilisation d'échantillons entaillés afin de provoquer une rupture des matériaux ductiles. Il peut être réalisé dans une plage de température de - 60°C à + 23°C. Cette méthode d'analyse est suivie conformément à la norme ASTM-D256. L'appareil utilisé est de marque CEAST type RESIL IMPACTOR.

A partir d'une plaque de 3mm d'épaisseur on confectionne des échantillons de dimensions : L = 127 mm et l = 10 mm à partir de découpeuse (**Figure III.10**) sur les quels une entaille centrale (en V) de 2,5 mm de profondeur est réalisée. Pour un souci de reproductibilité des résultats, trois essais sont réalisés et la valeur moyenne est retenue.

La caractéristique mesurée est la résistance au choc (résilience), notée a :

$$a = A_k/e \text{ (J/m)} \quad \text{(III.4)}$$

D'où :

a : la résilience au choc (J/m) ;

A_k : énergie moyenne absorbée (J) ;

e: épaisseur de l'éprouvette (m).



Figure III.10 : Appareillage et agencement expérimental pour le calcul de la résilience et les éprouvettes pour le test IZOD.

III.6.3. Analyse morphologique

III.6.3.1. Caractérisation morphologique par microscopie optique

Afin d'étudier la morphologie des matériaux et vérifier la dispersion des fibres dans les matériaux composites, la microscopie optique est utilisée pour prendre des photos de surface des films obtenus ainsi que pour déterminer les tailles des fibres. L'appareillage utilisé est un microscope optique de marque OPTIKA microscope ITALY.



Figure III.11 : L'appareillage de microscopie optique.

Chapitre IV
Résultats et discussion

Chapitre IVRésultats et discussion

Les résultats obtenus des différents tests effectués sur les différents échantillons sont présentés et discutés dans ce chapitre. Les propriétés, physiques, mécaniques et morphologiques ont été étudiées pour les matériaux composites PEHD/Liège, PEHD/Bois et PEHD/Liège/Bois.

IV.1. Caractérisation de la farine de bois et la farine de liège**IV.1.1. Caractérisation physico-chimique de la farine de bois**

Cette partie de l'étude, résume les principales caractéristiques physico-chimiques de la farine de bois, telles que la densité, le taux d'humidité, le taux de matière cellulosique et le taux de matière minérale (taux de cendres) qui sont obtenues expérimentalement par **Dr. Badrina DAIRI [1]** au niveau du laboratoire des Matériaux Polymères Avancés (LMPA) à l'Université de Bejaia. Les valeurs des différentes caractéristiques de la farine de bois sont rapportées en **tableau IV.I.**

Tableau IV.I : Caractéristiques physico-chimiques de la farine de bois.

<i>Caractéristiques</i>	<i>Farine de bois</i>
Taux d'humidité (TH)	4.04 %
Densité	0.8091
Taux de matière minérale (TMM)	12.48 %
Taux de matières cellulosique (TMC)	38.70 %

IV.1.2. Caractérisation physico-chimiques de la farine de liège**Tableau IV.2 :** Caractéristiques physico-chimiques de la farine de liège.

<i>Caractéristiques</i>	<i>Farine de Liège</i>
Taux d'humidité (TH)	4.8 %
Densité	0.631

IV.2. Caractérisation de différents composites

Les propriétés physiques, mécaniques et morphologiques des différentes formulations des composites élaborées (PEHD/Liège), (PEHD/Bois), (PEHD/Liège/Bois) ont été étudiées.

IV.2.1. Caractérisations physiques

IV.2.1.1. Test de densité

La faible densité du matériau lignocellulosique est l'un des avantages majeurs de son utilisation comme charge dans les composites à base de thermoplastique. La connaissance de la valeur de la densité de la farine de bois et de la farine de liège permet de prévoir la masse d'une construction à base de ces matériaux.

Les résultats du test de densité des composites PEHD/Farine de bois, PEHD/Farine de Liège, PEHD/Farine de bois/Farine de liège présentés dans la **Figure IV.1**, montrent qu'il y a une diminution de la densité avec les différentes charges (farine de bois et farine de liège) incorporée dans la matrice PEHD.

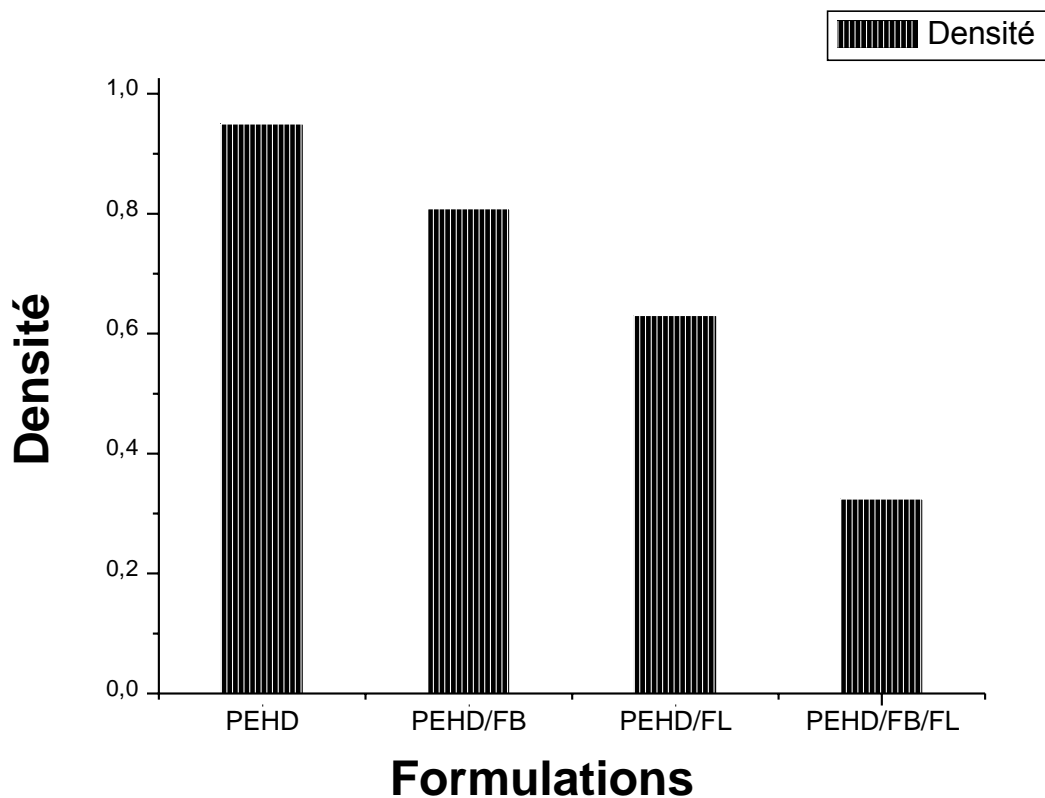


Figure IV.1 : Evolution de la densité à différentes formulations des composites PEHD vierge et des composites PEHD/FB, PEHD/FL, PEHD/FB/FL.

La mesure révèle que la densité de la farine de bois et la farine de liège est de l'ordre de 0,809 et 0.631 respectivement. A cet égard, l'incorporation de la farine de bois et de liège dans le polyéthylène haute densité conduit à l'obtention de composites à faible densité. Ces résultats sont en accord avec ceux de **Shinoj et al [2]**.

IV.2.1.2. Test d'absorption d'eau

L'humidité est un paramètre important pour les fibres végétales utilisées comme renforts dans les composites. Ces fibres présentent un caractère hydrophile et subissent ainsi des déformations importantes lorsqu'elles se trouvent dans une atmosphère humide. Ceci a plusieurs effets sur l'adhésion ainsi que sur les caractéristiques mécaniques du produit. L'eau absorbée conduit à un gonflement de la fibre et la structure de la matrice peut aussi être affectée par l'absorption d'eau telle qu'une réorientation de la chaîne et son rétrécissement [3].

L'évolution du taux d'absorption d'eau des différents composites élaborés PEHD/Liège, PEHD/Bois, PEHD/Liège/Bois, en fonction du temps, après 22 jours d'immersion dans l'eau distillée est illustré sur la **Figure IV.2**.

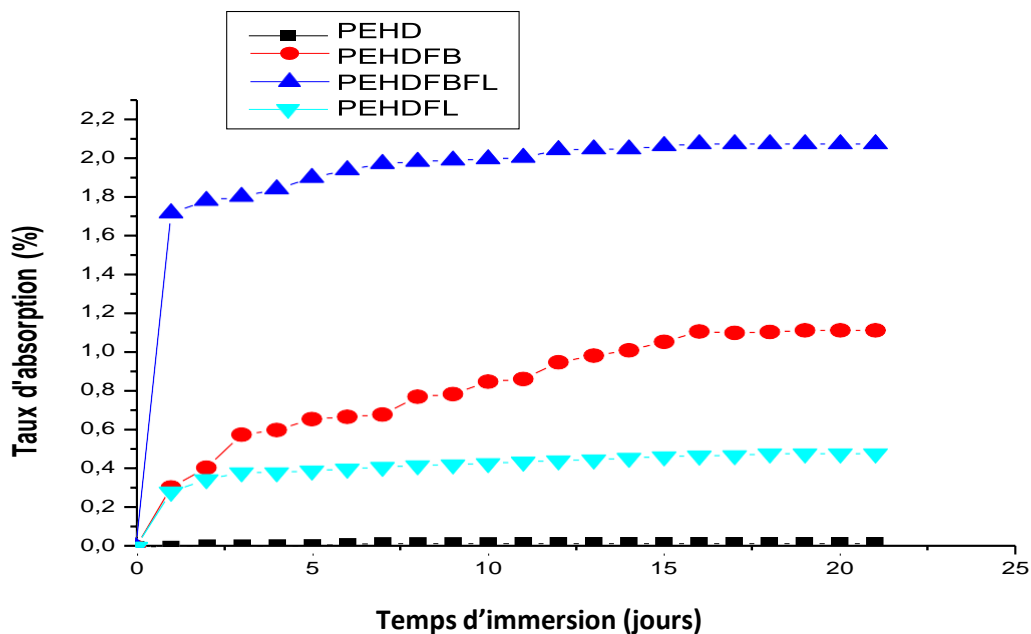


Figure IV.2 : Evolution du taux d'absorption d'eau de différentes formulations PEHD ; PEHD/Liège ; PEHD/Bois ; PEHD/Liège/Bois.

Ce test nous a permis de confirmer le caractère hydrophobe de la matrice utilisée. En effet, la **Figure IV.2**, nous montre clairement que le taux d'absorption d'eau du PEHD ne dépasse pas 0,0159 % quel que soit le temps d'immersion.

Nous pouvons constater que le composite hybride PEHD/Liège/Bois engendre un accroissement du taux d'absorption d'eau. Cette augmentation est assignée à l'augmentation de la concentration des groupements hydroxyles qui ont une forte affinité avec l'eau. Nous pouvons également attribuer ce phénomène à la mauvaise adhésion interfaciale fibre-matrice

se traduisant par l'augmentation de microvides. Pour les composites PEHD/Bois, PEHD/Liège ont atteint leurs saturations en eau (0,74 %, 1.11 % respectivement) au bout de 22 jours d'immersion. En revanche, le composite hybride PEHD/Liège/Bois a atteint un maximum d'absorption (2.07 %) au bout de 22 jours d'immersion.

D'après ces résultats, on peut dire que le taux d'absorption d'eau dépend du temps et de la nature de la charge incorporée dans la matrice PEHD.

IV.2.2. Caractérisations mécaniques

L'intérêt de l'incorporation des charges ou des fibres cellulosiques dans les matériaux composites est d'améliorer les propriétés mécaniques de ce dernier. La majorité des auteurs se rejoignent sur la dépendance de celles-ci à la fois, de la nature de la charge, de sa taille et de sa fraction mais également de l'état de dispersion dans la matrice utilisée [3].

IV.2.2.1. Test de Dureté Shore D

La dureté est une indication sur la résistance du matériau à la pénétration de l'aiguille du d'uro-mètre. Pour les matériaux composites, la dureté dépend de la distribution du renfort dans la matrice [4].

L'évolution de la dureté de différents composites élaborés PEHD/Liège, PEHD/Bois et PEHD/Liège/Bois est illustré sur la **Figure IV.3**.

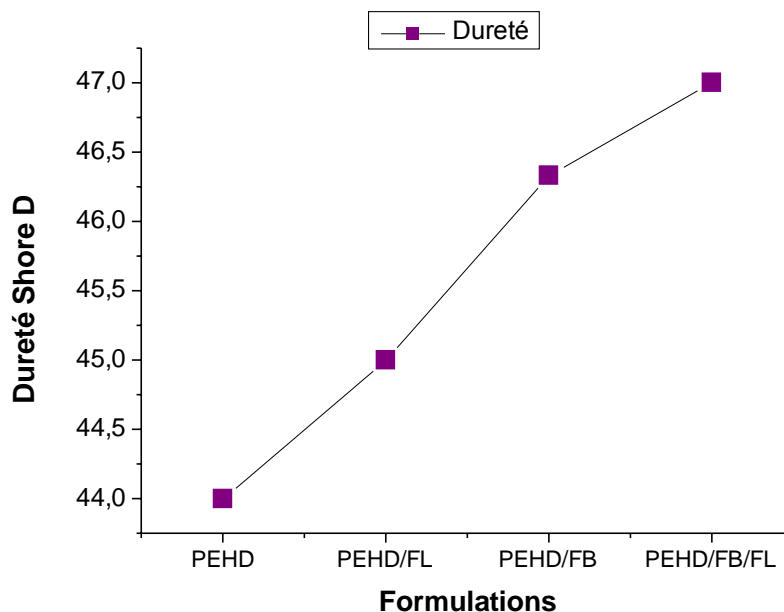


Figure IV.3 : La variation de la dureté de différents composites élaborés PEHD vierge, PEHD/Liège, PEHD/Bois, PEHD/Liège/Bois.

D'après la **Figure IV.3**, On constate une augmentation de la dureté avec l'incorporation de deux types de charges (Farine de bois et Farine de liège) dans la matrice PEHD. Cette augmentation est d'autant plus importante pour le composite hybride (PEHD/Farine de bois/Farine de liège).

Ces résultats sont prévisibles dans la mesure où les charges sont constitués de microfibrilles de cellulose qui est classée parmi les fibres dures ce qui se traduit par la difficulté de la pénétration de l'aiguille du duromètre dans le matériau composite. Ce résultat a été confirmé par **Md. Rezaur Rabman et al, S. Th. Georgopoulos et al [5, 6]**.

IV.2.2.2. Résistance au choc IZOD

L'essai de la résistance au choc a pour but de mesurer l'énergie nécessaire pour rompre en une seule fois une éprouvette entaillée [3].

Les résultats de la résistance au choc IZOD avec entaille de différents composites élaborés PEHD/Liège, PEHD/Bois et PEHD/Liège/Bois sont représentés sur la **Figure IV.4**.

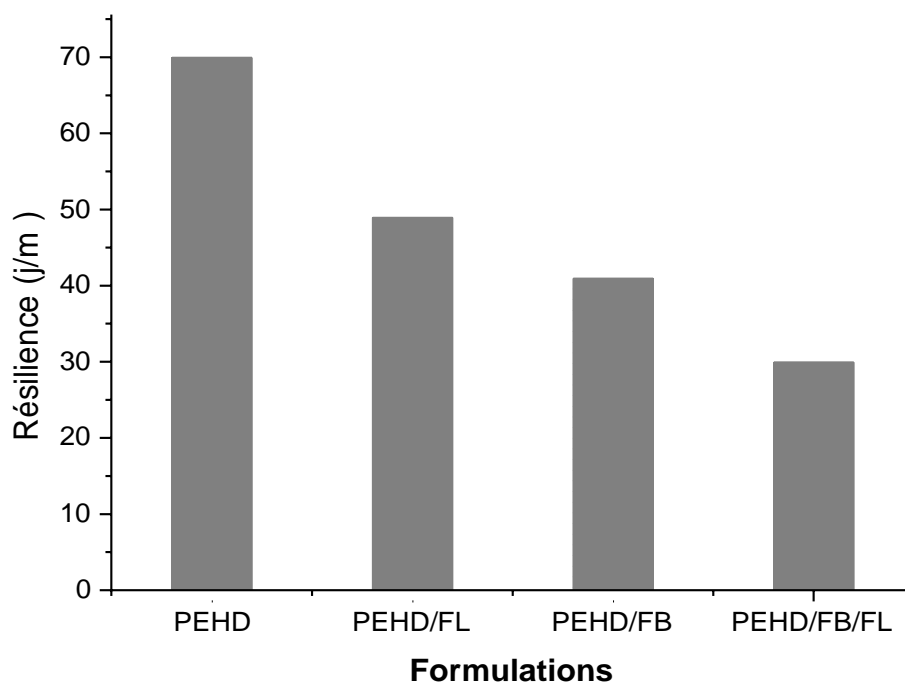


Figure IV.4 : La Variation de la résilience de différents composites élaborés PEHD vierge, PEHD/Liège, PEHD/Bois, PEHD/Liège/Bois.

D'après la **Figure IV.4**, qui donne les variations de la résilience des composites PEHD/Liège, PEHD/Bois, PEHD/Liège/Bois, montrent clairement une diminution de la résistance au choc après l'incorporation de Liège et de Bois dans la matrice PEHD, cette diminution est due à l'augmentation de la rigidité et les phénomènes à l'interface.

Les composites PEHD/Bois, PEHD/Liège ont des valeurs de la résistance au choc plus faible en comparant à celle du PEHD vierge. Donc le Bois et le liège à une rigidité supérieure à celle du polyéthylène haute densité, celle-ci augmente considérablement la rigidité du matériau composite, ce qui provoque également une diminution de la résistance au choc. Cette décroissance de la résilience à l'impact est également expliquée par les faibles interactions (interaction d'ordre physique) entre la matrice et la charge, donc une mauvaise adhésion interfaciale. Ceci a été déjà confirmé par les travaux de **Andrzej K. Bledzki et al**, [7].

IV.2.4 Caractérisation de l'état de dispersion de la farine de bois, et de la farine de liège dans la matrice polyéthylène haute densité

Parmi les techniques de caractérisation utilisées habituellement dans l'étude de la qualité de l'interface entre les charges, en particulier cellulosiques connues pour leur hydrophile importante, et la matrice thermoplastique (Polyéthylène haute densité) hydrophobe, on retrouve les méthodes microscopiques comme la microscopie optique, la microscopie électronique à balayage MEB, et récemment des méthodes plus sensibles dont la microscopie à force atomique MFA. D'autres méthodes sont également appliquées et qui s'appuient sur les conséquences engendrées par une meilleure adhésion et une bonne dispersion. Dans notre étude, nous avons utilisé la microscopie optique pour une caractérisation de la morphologie des surfaces des composites.

IV.2.4.1. Analyse de la morphologie par microscopie optique

Les changements induits par l'incorporation de la farine de bois, la farine de liège et la farine Bois-Liège dans la matrice vierge du polyéthylène haute densité, sont observés par la microscopie optique. Les images obtenues pour les différentes formulations PEHD vierge,

PEHD/liège, PEHD/Bois et PEHD/Liège/Bois sont représentées sur la **Figure IV.5**.

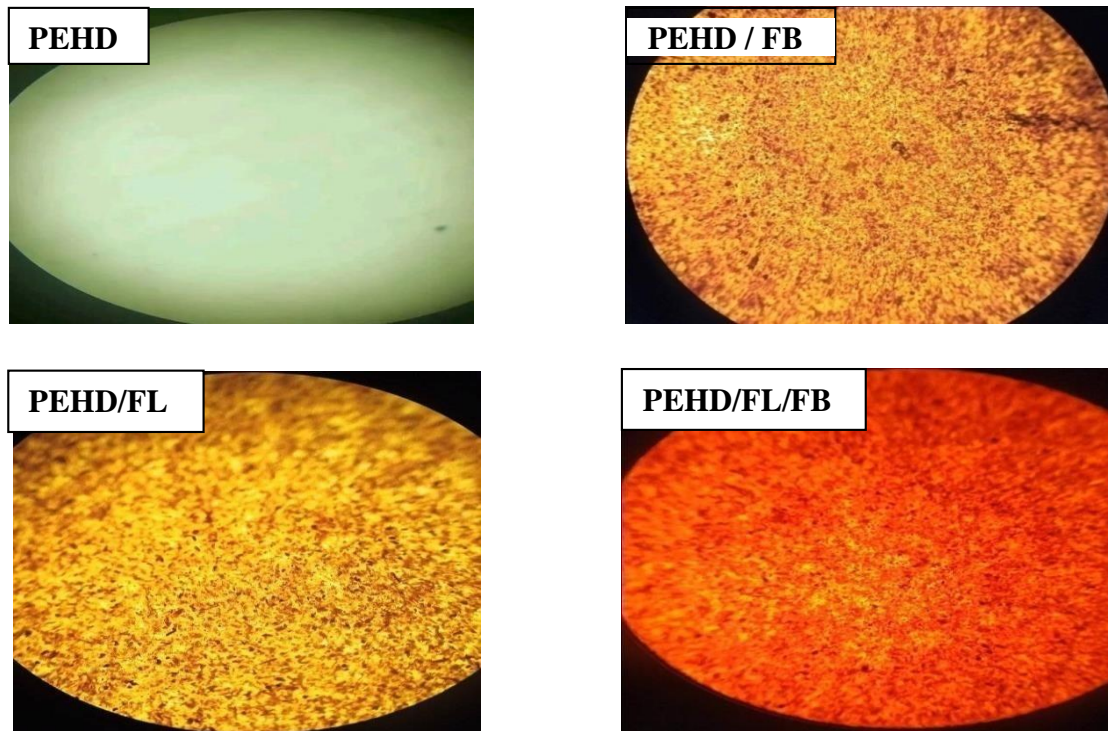


Figure IV.5 : *Micrographies en microscopie optique des surfaces des composites PEHD /Bois, PEHD/ Liège, PEHD/Bois/Liège.*

La micrographie de la surface du PEHD vierge (**Figure IV.5**), montre un état de surface homogène.

Les micrographies des composites de la **Figure IV.5** relatifs à l'incorporation de la farine de liège, de la farine de bois et la farine de liège-bois dans la matrice PEHD, décrivent nettement une surface hétérogène, irrégulière et la présence d'agrégats totalement séparés de la matrice de polyéthylène haute densité.

Ces agrégats augmentent en nombre dans le composite hybride PEHD/Liège/bois. Ceci est dû à l'incompatibilité des deux phases en raison de la faible adhésion interfaciale entre la farine de liège et la farine de bois à caractère hydrophile et le PEHD à caractère hydrophobe. Ces résultats sont en bonne concordance avec ceux rapportés par **B. MEGHLOUI [9]**.

Références Bibliographiques

- [1] Dairi Badrina, « Effet de la taille des fibres lignocellulosiques sur les propriétés thermiques et mécaniques des composites polychlorures de vinyle/Farine de bois », Mémoire de Magister en Génie des Polymères, Université Abderrahmane Mira Béjaïa (2010).
- [2] S. Shinoj, R. Visvanathan, S. Panigrahi, « Towards industrial utilization of oil palm fibre : Physical and dielectric characterization of linear low density polyethylene composites and comparison with other fibre sources », Biosystems Engineering, 106, 378-388 (2010).
- [3] Salem Krim, « Etude et caractérisation des matériaux composites à base de polypropylène chargé avec la farine de grignon d'olive », Mémoire de Magister en Génie des Polymères, Université Abderrahmane Mira Béjaïa (2009).
- [4] Djellali Souad, « Elaboration, Caractérisation et biodégradabilité des mélanges PEBD/PLA et PEBD/EGMA/PLA », Thèse de Doctorat en Génie des Polymères, Université Sétif 1 (2014).
- [5] MD. REZAUR RAHMAN, MD. MONIMUL HUQUE, MD. NAZRUL ISLAM, MAHBUB HASAN, « Mechanical properties of polypropylene composites reinforced with chemically treated abaca », Composites Part A, 40, 511-517, (2009).
- [6] S.TH.GEORGOPOULOS, P.A.TARANTILI, E.AVGERINOS, A.G. ANDREOPOULOS, E.G. KOUKIOS, « Thermoplastic polymers reinforced with fibrous agriculturalresidues », Polymer Degradation and Stability, 90, 303-312, (2005).
- [7] Andrzej K. Bledzki, Omar Faruk, « Creep and impact properties of wood fibre/polypropylene composites : influence of température and moisture content», Composites Science and Technology, 64, 693-700 (2004).
- [8] B. MEGHLAOUI, «Elaboration et caractérisation d'un composite biodégradable à matrice polymère et renfort naturel ».Mémoire de Doctorat, université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou.

Conclusion générale

Conclusion générales

Au cours de ces dernières années, l'utilisation des fibres végétales comme renfort dans les matériaux composites a connu un essor considérable. Ce gain d'intérêt de la combinaison de plusieurs avantages tels que : faible coût, faible densité, non toxicité hautes propriétés spécifiques.

L'étude réalisée dans ce travail avait pour objectif d'élaborer des composites (charge/matrice), produits par des procédés de transformation (malaxeur à deux cylindres suivi d'un moulage par thermo-compression).

Les composites correspondants ont été préparés à partir d'une matrice thermoplastique (Polyéthylène haute densité)/farine de liège et farine de bois de granulométrie 90 μm . Les composites obtenus sont ensuite caractérisés par la détermination des propriétés physiques, mécaniques et morphologiques.

L'analyse des résultats expérimentaux nous ont permis de tirer les principales conclusions suivantes :

- ❖ La caractérisation physique par la mesure de la densité et l'absorption d'eau a permis de déduire que :
 - La densité des composites PEHD/Liège, PEHD/Bois, PEHD/Liège/Bois est nettement inférieure à celle de PEHD vierge, on peut dire que les charges utilisées confèrent aux composites élaborés une légèreté.
 - Le taux d'absorption d'eau des composites élaborés PEHD/Liège, PEHD/Bois, PEHD/Liège/Bois dépend du temps d'immersion et la nature des charges incorporées dans la matrice PEHD.
- ❖ La caractérisation mécanique des composites élaborés a permis de déduire que :
 - La dureté des composites élaborés PEHD/Liège, PEHD/Bois, PEHD/Liège/Bois est supérieure à celle de PEHD vierge.
 - La résilience des différents composites élaborés PEHD/Liège, PEHD/Bois, PEHD/Liège/Bois a diminué par rapport à celle de PEHD vierge.
- ❖ La caractérisation morphologique par la microscopie optique de la matrice PEHD montre une surface homogène et régulière, contrairement aux composites PEHD/Farine de bois, PEHD/farine de liège et PEHD/Farine de bois/farine de liège décrivent nettement une surface hétérogène, irrégulière et la présence d'agrégat.

Conclusion générale

En guise de perspective :

A partir des conclusions dégagées du présent travail et pour une poursuite potentielle de cette étude, nous avons formulé les perspectives suivantes :

- Améliorer l'adhésion interfaciale des composites PEHD/Farine de bois, PEHD/Farine de liège, PEHD/Farine de bois/Farine de liège par l'introduction d'un agent de couplage ou un agent comptabilisant.
- Etude des propriétés thermiques par analyse calorimétrique différentielle à balayage (DSC) et analyse thermogravimétriques (ATG).
- Elaborer des matériaux composites hybrides à base de PEHD/Farine de bois/Farine de liège par les procédés d'extrusion et d'injection.
- Etudier la biodégradation de différents composites élaborés PEHD/Farine de bois, PEHD/ Farine de liège et PEHD/ Farine de bois/ Farine de liège.

Résumé

Résumé

Les fibres naturelles ont récemment attiré l'attention des scientifiques en raison de leurs propriétés : faible coût, faible densité, renouvelables, biodégradables et non abrasives. L'utilisation des fibres végétales dans la conception des matériaux composites à matrices polymériques permet d'associer un matériau résistant, léger, et peu coûteux. De plus, dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique, les produits ont tendance à intégrer un caractère écologique. Dans ce contexte, différentes formulations à base de polyéthylène haute densité ont été préparées (PEHD/Farine de bois, PEHD/Farine de liège, PEHD/Farine de bois/Farine de liège). Les différents composites élaborés sont initialement malaxés dans une calandre avant de préparer les différents échantillons d'une épaisseur moyenne de 2 et 3 mm par compression à 190°C. Ces derniers ont été caractérisés par diverses techniques : tests mécaniques, physiques et morphologiques.

Mots-clés : Fibres végétales, matériaux composites, polyéthylène haute densité, Farine de bois, Farine de liège, propriétés mécaniques.

Abstract

Natural fibers have recently attracted the attention of scientists due to their properties: low cost, low density, renewable, biodegradable and non-abrasive. The use of plant fibers in the design of composite materials with polymeric matrices makes it possible to combine a resistant, light and inexpensive material. In addition, for the sake of environmental protection and public health, products tend to incorporate an ecological character. In this context, different formulations based on high density polyethylene have been prepared (HDPE/Wood flour, HDPE/Cork flour, HDPE/Wood flour/Cork flour). The various composites produced are initially mixed in a calender before to prepare the various samples with an average thickness of 2 and 3 mm by compression at 190°C. These were characterized by various techniques : mechanical, physical and morphological tests.

Keywords: Vegetable fibers, composite materials, high density polyethylene, wood flour, cork flour, mechanical properties.

ملخص:

جذبت الألياف الطبيعية مؤخرا انتباه العلماء نظرا لخصائصها: منخفضة الكثافة، منخفضة التكلفة، متجددة، قابلة للتحلل البيولوجي.

يتيح استخدام الألياف النباتية في تصميم المواد المركبة مع المصفوفات البوليميرية إمكانية الجمع بين مادة مقاومة وخفيفة وغير مكلفة بالإضافة إلى ذلك، من أجل حماية البيئة والصحة العامة، تميل المنتجات إلى دمج الطابع البيئي. في هذا السياق، تم تحضير تركيبات مختلفة تعتمد على البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE/ دقيق الخشب، HDPE/ دقيق الفلين، HDPE/ دقيق الخشب/ دقيق الفلين). بمتوسط سمك 2 و 3 مم بالضغط عند 190 درجة مئوية. تميزت هذه بتقنيات مختلفة: الاختبارات الميكانيكية والفيزيائية والصرافية.

الكلمات المفتاحية: ألياف نباتية، مواد مركبة، بولي إيثيلين عالي الكثافة، دقيق الخشب، دقيق الفلين، خصائص ميكانيكية.