

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

*DÉVELOPPEMENT ET CARACTÉRISATION
D'UN MATÉRIAU COMPOSITE HYBRIDE À
BASE DES FIBRES DE LIÈGE ET D'ALFA*

Soutenu le 04/07/2023

Réalisé par : M^{elle} LEKOHAL Wiam

Encadré par : Dr. DAIRI Badrina

M^{elle} BOUMENDJEL Chourouk

Dr. BELLILI Nadira

M^{elle} SOUKIA Chaima

Année Universitaire 2022- 2023

The page is decorated with several large, soft-focus pink flowers, likely peonies, scattered around the central text area. The flowers are in various stages of bloom, with some showing their centers. The background is a light, neutral color, making the pink flowers stand out.

Remerciements

Avant tout, nous remercions ALLAH tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à bien ce travail. Nous tenons à remercier en premier lieu notre Encadrante Dr. B.DAIRI pour la confiance qu'il a placée en nous, pour sa permanente disponibilité, son investissement et ses précieux conseils qui nous ont guidés dans l'élaboration de ce travail. Nous remercions également tous les personnels du POLYMED de SKIKDA en particulier ceux de la Laboratoire chacun par son nom. Nous adressons également nos remerciements à tous les enseignants qui ont participé à notre formation et l'aide qu'ils nous ont fournie pendant la période d'étude.



Dédicaces

Je me fais plaisir de dédier affectueusement ce travail :

A ma chère mère et père bien-aimé, qui sont la joie de ma vie et qui ont donné toute leur vie pour me voir devenir ce que je suis.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

- Aux plus belles sœurs A celles qui portent dans leurs yeux des souvenirs de mon enfance et de ma jeunesse, mes soeurs : Wiam, Rihab, Ilhame, Tasnime et Ghofrane.

- À mes chères amies,

À qui les lignes se sont rétrécies à partir de leur souvenir, alors mon cœur s'est élargi pour eux, mes amis Sara et Tahani

Je tiens également à saluer tous mes collègues et tous la promotion de 5 ans et pour les bons moments qu'on a passés ensemble.

A tous les membres de ma grand famille «BOUMENDJEL et L'EMOUNES», petits et grands Veuillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection très chaleureuse, avec mes souhaits de bonheur et de santé

Et bien sûr je n'oublie pas mon fidèle et le beau binôme dans ce travail Wiam et Chaima. À tous qui m'ont aidé de loin ou de près à réaliser ce travail.

Chourouk



Dédicaces

Grace à Dieu tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté et la force pour réaliser ce mémoire. Je dédie ce modeste travail que j'espère utile : A mon très cher père Yacine , qui a toujours fait preuve d'amour et de courage pour assurer à tous une bonne éducation , qu'il puisse jouir de ce qui à été le fruit de ses encouragements et de ses sacrifices , il a toujours été pour moi l'un de ces extraordinaires pères aux talents multiples , je n'ai rien de plus cher à lui dédié que ce modeste mémoire en témoignage de ma gratitude . A ma très chère mère Souhila, qui m'a toujours été d'un grand soutien moral, par ses encouragements, elle à toujours demeuré dévouée à mon bien être, ce témoignage est en guise de reconnaissance de ma part. Je tiens à remercier spécialement tous me cher frère Nawfel et mes sœurs Achwak et Nour El Houda. Et à tous mes amies Iman, Asma, pour leur soutien moral.

Wiam





Dédicaces

'Grâce à Dieu tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté et le force pour réaliser ce mémoire'.

A mon très cher père :

Je tiens à exprimer ma gratitude pour tous les sacrifices sans limites dont tu as toujours fait preuve, malgré les difficultés de la vie, et pour le soutien que vous avez apporté à chaque instant de ma vie scolaire et universitaire, je ne pourrais pas rendre ne serait-ce qu'une partie infime de ce que je lui dois.

A ma très chère mère :

Ta patience, ton bienveillance, ton dévouement et ton courage sont admirables. Tu étais toujours présente pour m'écouter, me reconforter et me montrer le droit chemin. Tu as déployé énormément d'efforts pour ma réussite. Tu es une mère formidable, tous les mots du monde ne peuvent exprimer mon amour et ma reconnaissance envers toi.

A mes très chers frères KAMEL EDDINE et AMIR :

Ceci est un témoignage de mon profond attachement et reconnaissance pour votre soutien et votre présence indispensable. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur Mon amour pour vous est si profond.

Aussi :

Ma petite fille Farah et à tous ceux qui m'ont soutenu de ma famille et mes amies, Merci.

'A ceux qui me sont les plus chers, a ceux qui ont toujours cru en moi, et qui m'ont toujours encouragé et qui ont été à mes côtés à chaque étape, Merci de tout cœur'.

Chaima



LISTE DES ABREVIATIONS

PE : polyéthylène.

PP : Polypropylène.

CMO : Les composites à matrices organiques.

CMC : Les composites à matrices céramiques.

CMM : Les composites à matrices métalliques.

SMC : Sheet Moulding Compound.

TD : Thermodurcissables.

TP : Thermoplastiques.

PE : Polyéthylène.

PEBD : Polyéthylène basse densité.

PEHD : Polyéthylène haute densité.

PEMD : Polyéthylène moyenne densité.

FFL : Fédération Française du Liège.

IML : Institut méditerranéen du liège.

WPC : Wood Plastic Composite.

PE-g-MA : l'anhydride maléique greffé sur Polyéthylène.

SPF : Fibre de palmier à sucre.

RF : Fibre roselle.

TPU : Polyuréthane thermoplastique.

MEB : Microscopie électronique à balayage.

MFA : Microscopie à force atomique.

PLA : Poly (acide lactique) ou polylactide.

PP : Polypropylène.

ASTM : American System Technique Materials.

CP2K : Complexe Pétrochimique 2 de SKIKDA.

FL : Farine de liège.

FA : Farine d'alfa.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Généralités sur les matériaux composites

- Figure I.1** : Schéma simplifié d'un matériau composite (Page 05).
- Figure I.2** : Constituants des matériaux composites (Page 07).
- Figure I.3** : Constituants d'un matériau composite (Page 08).
- Figure I.4** : Différentes familles de Matrice (Page 09).
- Figure I.5** : Les différents types de renfort de base (Page 14).
- Figure I.6** : Classification des fibres végétales (Page 16).
- Figure I.7** : Structure chimique de la cellulose (Page 18).
- Figure I.8** : Représentation schématique de la hiérarchie de structure dans une fibre cellulosique (Page 18).
- Figure I.9** : Structure chimique de l'hémicellulose (Page 19).
- Figure I.10** : Structure de la lignine (Page 19).
- Figure I.11** : Structure d'une chaîne d'acide polygalacturonique et formation d'un coude par la présence de rhamnose (Page 20).
- Figure I.12** : Images de plante Alfa à région Driàat dans Hamam Al-Dalaa (Page 20).
- Figure I.13** : Morphologie de la plante d'alfa (Page 22).
- Figure I.14** : Des exemples d'artisanat Alfatière (des paniers, des paillassons, des espadrilles) (Page 23).
- Figure I.15** : Le Chêne liège dans le monde (Page 24).
- Figure I.16** : Formation du liège (Page 25).
- Figure I.17** : Le liège mâle (IML) (Page 26).
- Figure I.18** : Liège femelle (de reproduction) (IML) (Page 26).
- Figure I.19** : La composition chimique du liège (page 28).
- Figure I.20** : Représentation schématique de la section axiale du chêne-liège (Page 28).
- Figure I.21** : Bouchon liège naturel (Page 30).
- Figure I.22** : Bouchon colmaté, aggloméré (Page 30).
- Figure I.23** : Interface fibre matrice (Page 31).
- Figure I.24** : Application des matériaux composites à base de fibres naturelles (Page 34).

CHAPITRE II

Synthèses bibliographiques

Figure II.1 : Comparaison de la résistance à la traction de composites hybrides avec des composites à fibre unique (sisal / chanvre) à 30% de charge de fibre (**Page 46**).

Figure II.2 : Résistance à la traction et module des composites hybrides RF/SPF/TPU (**Page 49**).

Figure II.3 : Résistance à la flexion et module des composites hybrides RF/SPF/TPU (**Page 49**).

Figure II.4 : Résistance à l'impact des composites hybrides RF/SPF/TPU (**Page 50**).

Figure II.5 : Résistance à la traction avant et après l'absorption d'eau des composites hybrides avec : 20% et 30% de teneur totale en fibres (**Page 55**).

Figure II.6 : Résistance à la flexion avant et après l'absorption d'eau des composites hybrides avec : 20% et 30% de teneur totale en fibres (**Page 56**).

Figure II.7 : Résistance à l'impact des composites hybrides avec : 20 % et 30 % de teneur totale en fibres (**Page 56**).

Figure II.8 : Résultat de la résistance à la traction pour différentes fractions volumiques (**Page 59**).

Figure II.9 : Résultat de la résistance à la flexion pour différentes fractions volumiques (**Page 59**).

CHAPITRE III

Matériaux utilisés et techniques expérimentales

Figure III.1 : Préparation des composites et leurs caractérisations (**Page 63**).

Figure III.2 : Photo représentatif du PEHD 5502 sous forme poudre (**Page 64**).

Figure III.3 : Préparation physique de la fibre d'alfa : (a) les tiges d'alfa récoltées, (b) la fibre d'alfa découpée, (c) la fibre d'alfa broyée et tamisée (**Page 65**).

Figure III.4 : Une tamiseuse automatique (**Page 66**).

Figure III.5 : Poudre de liège (**Page 66**).

Figure III.6 : Vue d'ensemble de la calandre utilisée lors de la préparation des composites (**Page 67**).

Figure III.7 : les films des composites PEHD/Alfa, PEHD/Liège, PEHD/Liège/Alfa (**Page 67**).

Figure III.8 : la presse hydraulique (**Page 68**).

Figure III.9 : Préparation des éprouvettes (**Page 68**).

Figure III.10 : Appareillage et Agencement expérimental pour le calcul de la résilience IZOD (**Page 70**).

Figure III.11 : Epreuve avant le test (**Page 70**).

Figure III.12 : Epreuve après le test (**Page 70**).

Figure III.13 : Courbes typiques d'essais de traction pour différents matériaux (**Page 72**).

Figure III.14 : Vue d'ensemble de la machine de traction TesT GmbH (**Page 72**).

Figure III.15 : Echantillon sous forme d'haltère (**Page 73**).

Figure III.16 : L'appareillage de microscope optique (**Page 73**).

CHAPITRE IV

Résultats et discussion

Figure IV.1 : Evolution de la densité de différentes formulations PEHD, PEHD/Alfa, PEHD/Liège, PEHD/Liège/Alfa (**Page 76**).

Figure IV.2 : Evolution du taux d'absorption d'eau de différentes formulations PEHD ; PEHD/Alfa ; PEHD/Liège ; PEHD/Alfa/Liège (**Page 77**).

Figure IV.3 : Evolution de la résilience de différentes formulations PEHD, PEHD/Alfa, PEHD/Liège, PEHD/Alfa/Liège (**Page 78**).

Figure IV.4 : Evolution de la contrainte à la rupture de différentes formulations PEHD, PEHD/Alfa, PEHD/Liège, PEHD/Alfa/Liège (**Page 79**).

Figure IV.5 : Evolution du module d'Young des différents composites PEHD ; PEHD/Alfa ; PEHD/Liège ; PEHD/Alfa/Liège (**Page 80**).

Figure IV.6 : Evolution de l'allongement à la rupture des différentes formulations PEHD, PEHD/Alfa, PEHD/Liège, PEHD/Alfa/Liège (**Page 81**).

Figure IV. 7 : Micrographie en microscopie optique de la surface PEHD Vierge (**Page 82**).

Figure IV. 8 : Micrographie en microscopie optique des surfaces des composites PEHD / Liège, PEHD/Alfa et PEHD/Liège/Alfa (**Page 83**).

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Généralités sur les matériaux composites

Tableau I.1 : Classification structurale des matériaux hybrides organiques-inorganiques (**Page 08**).

Tableau I.2 : Différentes caractéristiques des résines thermoplastiques et thermodurcissables (**Page 10**).

Tableau I.3 : Caractéristiques majeures des différentes familles des polyéthylènes (**Page 11**).

Tableau I.4 : Les principaux avantages et inconvénients (**Page 13**).

Tableau I.5 : Composition chimique (%) des quelques fibres végétales (**Page 17**).

Tableau I.6 : la répartition de la plante d'Alfa (**Page 21**).

CHAPITRE II

Synthèses bibliographiques

Tableau II.1 : Résistance à la flexion et à la traction de différents composites (**Page 58**).

CHAPITRE III

Matériaux utilisés et techniques expérimentales

Tableau III.1 : Principales caractéristiques du PEHD 5502 (**Page 64**).

Tableau. III.2 : Composition des différentes formulations (**Page 68**).

Sommaire

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
Références bibliographiques.....	03

CHAPITRE I

Généralité sur les matériaux composites

I.1. Généralité sur les matériaux composites.....	04
I.2. Présentations des matériaux composites.....	04
I.2.1. Définition.....	04
I.2.2. Classification des matériaux composites	05
I.2.2.1. Classement suivant la nature des constituants ou composants	05
I.2.2.2. Classement suivant la forme des constituants.....	06
I.2.3. Types des matériaux composites	06
I.2.3.1. Les composites à grande diffusion.....	06
I.2.3.2. Les composites à haute performances.....	06
I.3. Matériaux hybrides.....	07
I.3.1. Définition des matériaux hybrides.....	07
I.3.2. Classement des matériaux hybrides.....	07
I.4. Les constituants d'un matériau composite.....	08
I.4.1. Matrice.....	08
I.4.1.1. Matrices thermodurcissables (TD).....	09

I.4.1.2. Matrices thermoplastiques (TP).....	09
I.5. Le polyéthylène (PE).....	10
I.5.1. Polyéthylène à haute densité.....	11
I.5.2. Histoire et développement.....	12
I.5.3. Caractéristiques du PEHD.....	12
I.5.4. Propriétés des polyéthylènes hauts densité.....	12
I.5.4.1. Propriétés physiques.....	12
I.5.4.2. Propriétés chimiques.....	12
I.5.4.3. Propriétés électriques.....	13
I.5.4.4. Propriétés mécaniques.....	13
I.5.5. Avantages et Inconvénients du PEHD.....	13
I.5.6. Domaines d'application du PEHD.....	13
I.6. Renforts.....	14
I.6.1. Les fibres végétales.....	15
I.6.1.1. Définition.....	15
I.6.1.2. Classification des fibres végétales.....	15
I.6.1.3. Composition chimique des fibres végétales.....	16
a) Cellulose.....	17
b) Hémicellulose.....	18
c) Lignine.....	19
d) Pectine.....	19
e) Cires.....	20
I.7. Alfa.....	21
I.7.1. L'historique.....	21
I.7.2. Définition.....	21
I.7.3. Nomenclature et classification botanique.....	21

I.7.4. La morphologie et structure de fibre Alfa.....	22
I.7.5. La composition chimique de fibre Alfa.....	23
I.7.6. Domaines d'applications.....	23
I .8. Le Liège.....	24
I .8.1. Histoire Du liège.....	24
I .8.2. Définition.....	24
I .8.3. La formation du liège.....	25
I.8.4. Les types de liège.....	25
I.8.4.1. Le liège mâle.....	25
I.8.4.2. Le liège femelle (de reproduction).....	26
I.8.5. La composition chimique du liège.....	26
I.8.6. Morphologie du liège.....	28
I .8.7. Utilisation de liège.....	29
I.9. Adhésion de l'interface.....	30
I.9.1. Notion d'adhésion.....	30
I.9.2. Interface fibre/matrice.....	30
I.9.3. Modification des interactions à l'interface.....	31
I.9.3.1. Les méthodes physiques.....	31
I.9.3.2. Les méthodes chimiques.....	32
I.10. Application des composites à base des fibres végétales.....	33
I.11. Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	34
Références bibliographiques.....	36

CHAPITRE II

Synthèses bibliographiques

Synthèses bibliographiques	44
Références bibliographiques	60

CHAPITRE III

Matériaux utilisés et techniques expérimentales

III.1. Matériaux utilisés.....	64
III.1.1. Polyéthylène haut densité (PEHD).....	64
III.1.2. Préparation des charges.....	64
III.1.2.1. Préparation de la charge d'alfa à partir de la tige.....	64
III.1.2.2. Préparation de la poudre de liège.....	66
III.2. Techniques expérimentales.....	66
III.2.1. Préparation des composites PEHD/Liège/Alfa.....	66
III.2.1.1. Le calandrage.....	67
III.2.1.2. Moulage par compression.....	67
III.3. Techniques de caractérisation des matériaux élaborés.....	68
III.3.1. Caractérisation physique.....	68
III.3.1.1. Détermination de la densité.....	68
III.3.1.2. Absorption de l'eau.....	69
III.3.2. Caractérisation mécanique.....	69
III.3.2.1. Méthode IZOD.....	69
III.3.2.2. Essai de traction.....	70

Développement et caractérisation d'un matériau composite hybride à base des fibres de liège et d'alfa

III.3.3. Caractérisation morphologique par microscopie optique.....73
Références bibliographiques.....74

CHAPITRE IV

Résultats et discussion

IV.1. Caractérisation de composite hybride.....75
IV.1.1. Caractérisation physiques.....75
IV.1.1.1. Teste de la densité.....75
IV.1.1.2. Teste de l'absorption d'eau.....76
IV.1.2. Caractérisation mécaniques.....78
IV.1.2.1. Résistance au choc IZOD.....78
IV.1.2.2. Essai de traction.....79
IV.1.2.2.1. Evolution de la contrainte à la rupture.....79
IV.1.2.2.2. Evolution du module d'Young.....80
IV.1.2.2.3. Evolution de l'allongement à la rupture.....81
IV.1.3. Caractérisation de l'état de dispersion de farine de liège, farine d'alfa et farine Liège-Alfa dans la matrice polyéthylène haute densité.....82
IV.1.3.1. Analyse de la morphologie par microscopie optique.....82
Références bibliographiques.....84

CONCLUSION GENERALE.....86
PERSPECTIVES.....87

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

A l'heure actuelle, nous vivons dans un environnement de matière plastique puisque nous les trouvons sous forme de biens de consommation, dans tous les domaines de notre vie quotidienne. Ces applications nécessitent d'associer les matrices polymères avec un ou plusieurs autres composants (fibres, renforts particuliers, argiles, polymère de nature différente,...) pour avoir des matériaux hybrides à propriétés modifiées, voire même améliorées [1].

Au cours des dernières années, on a constaté un intérêt croissant pour l'intégration de deux ou plusieurs charges dans une matrice commune, Cette croissance résulte d'un objectif, à savoir l'amélioration des propriétés du matériau composite résultant afin d'obtenir les propriétés souhaitées et une meilleure performance de ce composite. L'objectif principal était de surmonter la limitation de la matrice renforcée par une seule charge avec la ou les autres charges qui ont des propriétés similaires ou même meilleures par rapport à la fibre initiale. Ce nouveau concept est connu sous le nom « d'hybridation », dans lequel deux ou plusieurs charges peuvent être incorporées dans une matrice commune pour surmonter les défauts de l'autre charge. Le processus d'hybridation recoupe de nombreux domaines de recherche, tels que : la mécanique, la chimie, l'ingénierie, la physique, la science et la technologie, la science des polymères, l'électrochimie, la métallurgie et les carburants énergétiques. Indépendamment du domaine de recherche, l'objectif principal était de trouver une combinaison de trois matériaux ou plus ayant de meilleures performances et propriétés par rapport à chaque matériau pour une application donnée. L'hybridation peut compenser les inconvénients d'un composant par l'ajout d'une autre fibre. Pour qu'un effet hybride se produise, il faut que les deux fibres varient par leurs propriétés mécaniques et par les interfaces qu'elles forment avec la matrice.

De ce fait, une attention considérable dans la communauté de chercheurs est portée sur l'utilisation des fibres naturelles comme renfort dans la conception des matériaux composites permettant d'associer un matériau résistant, léger, non abrasif, structuré et à faible coût [2,3].

Cependant, malgré tous ces avantages les fibres naturelles soulèvent un désagrément majeur lorsqu'on les associe avec les matières plastiques en particulier les polyoléfinés (telle que : polypropylène, polyéthylène, polystyrène...). En effet, la matière ligneuse possède une forte

affinité avec l'eau (caractère hydrophile fort) ce qui crée une incompatibilité d'interface entre les matériaux lignocellulosiques et les thermoplastiques à caractère fortement hydrophobe.

Cette incompatibilité interfaciale affecte la synergie entre les différents constituants du composite tout en sachant que l'interface est le lieu privilégié du transfert des contraintes entre le renfort et la matrice. A la base de cet inconvénient que beaucoup de travaux de recherche ont été menés pour tenter d'abaisser la tension superficielle entre les fibres végétales et les thermoplastiques [2,4].

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

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les matériaux composites à fibres végétales.

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

Le troisième chapitre constitue la partie expérimentale qui présente les matériaux utilisés, la préparation des formulations PEHD/Liège ; PEHD/Alfa ; PEHD/Liège/Alfa et les différentes techniques utilisées pour caractériser les différents composites élaborés.

Le dernier chapitre traitera l'ensemble des résultats obtenus et leurs discussions.

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

Références bibliographiques

- [1] A. E. G. MERDAS, « Utilisation du Tissu de Fibre de Carbone (TFC) dans la réparation et le renforcement des poutres en béton armé ». Thèse de Doctorat. Université Des Frères Mentouri, Constantine, **2005**.
- [2] F. MICHAUD, « Rhéologie de panneaux composites Bois/thermoplastiques Sous chargement thermomécanique : Aptitude au post formage ». Thèse de Doctorat, Université Laval Québec, Canada et université Bordeaux, France, **2003**.
- [3] M.J. John, R.D. Anandjiwala, « Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites ». Polymer Composites, Wiley Online Library, **2008**.
- [4] D. Metin, F. Tihminliog, D. Balkose, S. U lku, « The effect of interfacial interactions on the mechanical properties of polypropylene/natural zeolite composites ». Composites: Part A 35, **2004**.

CHAPITRE I

Généralités sur les matériaux composites

CHAPITRE I

Généralités sur les matériaux composites

Ce premier chapitre est consacré à aux généralités sur les matériaux composites à fibres végétales.

I.1. Généralité sur les matériaux composites

Les polymères sont recherchés pour leurs propriétés physico-chimiques, mécaniques ou encore optiques, électriques... Cependant, au moment de la conception de l'objet, on se rend souvent compte que les propriétés du polymère seul sont insuffisantes. En effet, la technologie moderne a besoin de matériaux qui allient à la fois une rigidité, une résistance mécanique, une ténacité élevée et une grande légèreté. Aucun matériau simple ne permet de combiner ces caractéristiques physiques ; c'est pourquoi, depuis un certain nombre d'années, on cherche à obtenir des matériaux combinant différentes propriétés : les matériaux composites [1]. Les composites peuvent offrir des solutions alternatives pour la réalisation de constructions mécaniquement exigeantes, et innovantes dans le cadre du développement durable. De nos jours, l'usage des matériaux composites dans différents domaines technologiques (microélectronique, aéronautique, transports...) croît de plus en plus [2].

I.2. Présentations des matériaux composites

I.2.1. Définition

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de plusieurs matériaux de natures différentes. Les composites sont le plus souvent constitués d'une matrice dans laquelle nous dispersons de façon contrôlée ou non des renforts (fibres). La matrice maintient les renforts et assure les transferts de charge, tandis que les renforts apportent principalement leurs Caractéristiques mécaniques élevées (modules et limites d'élasticité, résistance mécanique...) [3].

Un matériau composite consiste, dans le cas le plus général, d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différents, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus

dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue et appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériau renforçant.

Le renfort, le plus souvent sous forme fibreuse ou filamentaire, assure l'essentiel des propriétés mécaniques. La matrice joue le rôle de liant afin de protéger le renfort de l'environnement, de le maintenir dans sa position initiale et d'assurer la transmission des efforts. Entre le renfort et la matrice, existe une zone de liaison appelée interface. Un matériau composite est la plupart du temps hétérogène et anisotrope (dont les propriétés mécaniques dépendent de la direction) [4].

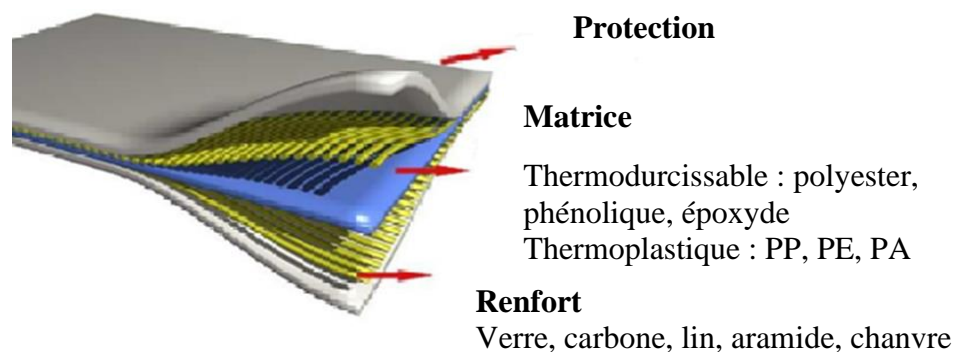


Figure I.1 : Schéma simplifié d'un matériau composite [5].

I.2.2. Classification des matériaux composites

Les propriétés du matériau composite dépendront de la nature, de la texture et de la forme du renfort, de sa quantité introduite, de la qualité de l'interface matrice/renfort et enfin du procédé de mise en œuvre. On peut donc imaginer une infinité de combinaison matrice/charge qui permettrait d'obtenir des matériaux composites. Ces différentes configurations dépendent de l'utilisation finale du matériau et du procédé de mise en œuvre [6].

Les composites peuvent être classés selon la forme ou la nature des composants :

I.2.2.1. Classification suivant la nature des constituants ou composants

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice [7].

- **Les composites à matrices polymère ou organique (CMO)** ; telles que les polymères organiques (résine thermodurcissable ou thermoplastique) [8] ; qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle [7].

- **Les composites à matrices céramiques (CMC)** ; réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines spatial, nucléaire et militaire, ainsi que le freinage.
- **Les composites à matrices métalliques (CMM)** ; Ces matériaux peuvent aussi être classés selon la nature du renfort [8].

I.2.2.2. Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à fibres et les matériaux composites à particules.

a. Composites à fibres :

Un matériau composite est un composite à fibre si le renfort est sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres Continues (fibres longues), soit sous forme de fibres discontinues (fibres courtes) [3, 4].

b. Composites à particules :

Un matériau composite est dit à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, etc. Le choix de l'association matrice/particules dépend des propriétés souhaitées du composite [3, 4].

I.2.3. Types des matériaux composites

On distingue deux types de composites : les composites à grande diffusion et les composites hautes performances.

I.2.3.1. Les composites à grande diffusion

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (moulage par contact, SMC (Sheet Moulding Compound) et injection).

I.2.3.2. Les composites à hautes performances

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées.

Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%. Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- Drapage autoclave, enroulement filamentaire.
- Beaucoup de procédés encore manuels.
- CMM (composites à matrice métallique), CMC (composites à matrice céramique) [9].

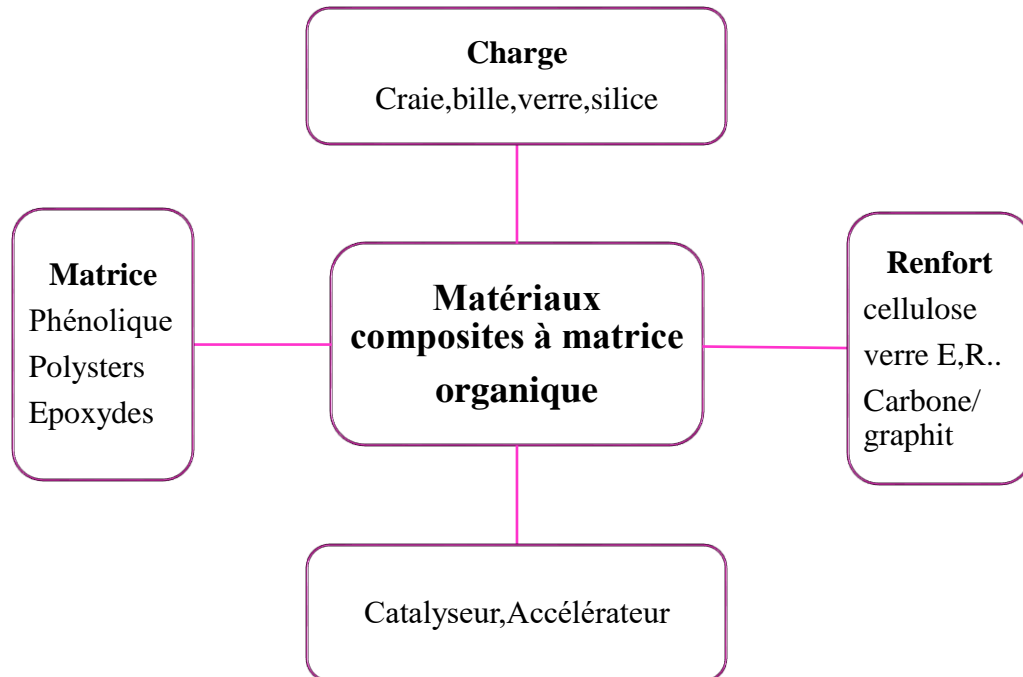


Figure I.2 : Constituants des matériaux composites [10].

I.3. Matériaux hybrides

I.3.1. Définition des matériaux hybrides

Un matériau hybride est un système dans lequel coexistent à la fois des espèces organiques et inorganiques. La nature hybride de ces matériaux leur confère non seulement des propriétés intermédiaires entre le minéral et l'organique mais également des comportements nouveaux [11].

I.3.2. Classement des matériaux hybrides

Le classement des matériaux hybrides se fait en considérant la nature et l'importance ou la force de l'interaction entre les phases organique (O) et inorganique (I) du matériau. Les classes principales sont au nombre de deux et regroupées dans le **tableau I.1** [12, 13]. La structure de la classe I qui résulte essentiellement d'interactions faibles et de type électrostatique est définie par l'incorporation de l'une des deux phases dans l'autre. Dans la classe II, les interactions peuvent être aussi bien faibles que fortes. La structure résultante présente deux types de

configurations issues soit d'une greffe soit d'une greffe et une incorporation d'une phase dans l'autre.

Tableau I.1 : Classification structurale des matériaux hybrides organiques-inorganiques.

	Interactions entre O et I	Structure
Classe I	-Faibles : interactions électrostatiques	- Incorporée : O dans I ou I dans O
Classe II	- Fortes : liaisons covalentes - Fortes et faibles : liaisons covalentes, ioniques ou de coordination et interactions électrostatiques	- Greffée : O-I -Greffée et Incorporée : I et/ou O dans O-I

I.4. Les constituants d'un matériau composite

Un matériau composite pris au sens adopté dans notre travail est constitué :

- D'une matrice à laquelle sont ajoutés dans certain composite des charges.
- Des renforts, constitués de fibres.

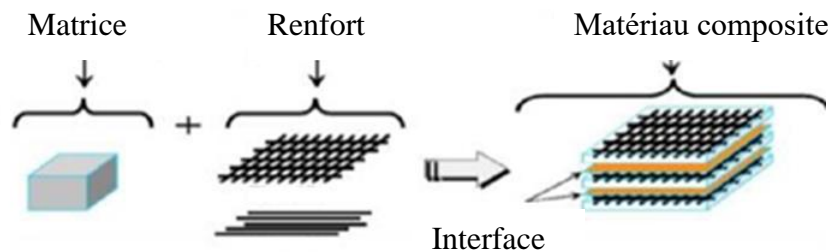


Figure I.3 : Constituants d'un matériau composite [14].

I.4.1. Matrice

La matrice est un composant essentiel du matériau composite, elle est légère, quelque peu déformable et présente une certaine compatibilité avec le renfort, son rôle est de lier les fibres de renfort, de transférer les contraintes auxquelles le matériau est exposé sur les fibres pour le protéger des agressions extérieures (choc, thermomécanique), de donner la forme voulue au matériau composite et de lui apporter une résistance chimique [15].

Il existe différentes familles de matrices utilisées dans les matériaux composites **figure I.4**.

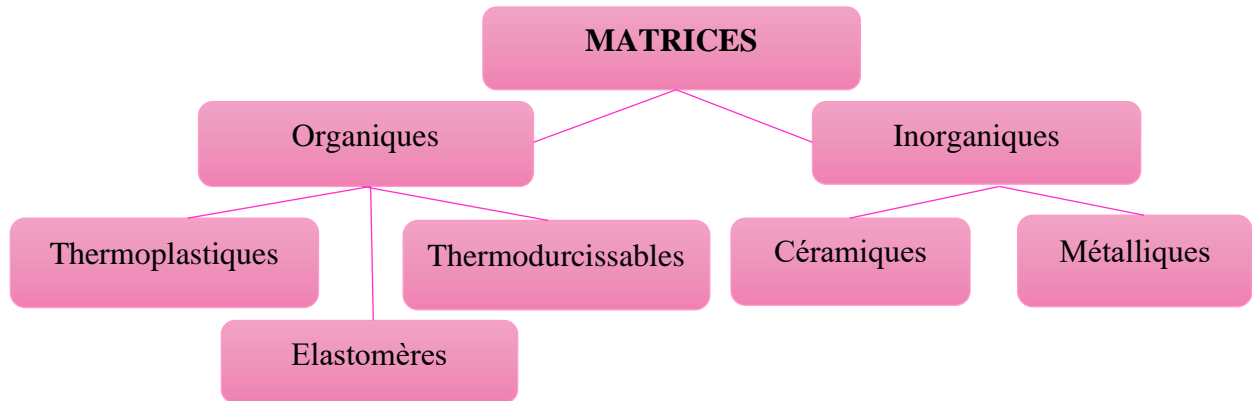


Figure I.4 : Différentes familles de Matrice [15].

Les résines les plus utilisées dans les matériaux composites sont :

I.4.1.1. Matrices thermodurcissables (TD)

Les thermodurcissables présentent une structure tridimensionnelle. La polymérisation induit un pontage des macromolécules et cette structure se solidifie de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée. Pour le matériau obtenu après mise en œuvre, les liaisons entre macromolécules sont des liaisons chimiques fortes : cette transformation est irréversible.

I.4.1.2. Matrices thermoplastiques (TP)

Les thermoplastiques présentent une structure linéaire (ou légèrement ramifiée) enchevêtrée qui ne résulte pas d'une polymérisation. Lors de la mise en forme par chauffage, les macromolécules se replient puis se bloquent au cours d'un refroidissement d'où une solidification. Pour le matériau obtenu après mise en œuvre, les liaisons entre macromolécules sont des liaisons physiques faibles de type Van Der Waals : cette transformation est réversible.

Le tableau suivant **tableau I.2** représente certaines caractéristiques des résines thermoplastiques et thermodurcissables :

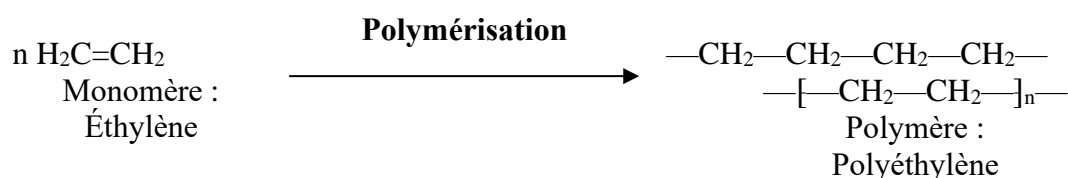
Tableau I.2 : Différentes caractéristiques des résines thermoplastiques et thermodurcissables [16].

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

I.5. Le polyéthylène (PE)

Le polyéthylène, ou polythène (sigle générique PE), est un polymère le simple et le moins cher. Le polyéthylène est la polyoléfine la plus anciennement préparé industriellement, il est issu de la polymérisation du monomère éthylène gazeux seul pour former un homopolymère [17].

La formule chimique de l'éthylène est : $(\text{CH}_2 = \text{CH}_2)$



Les PE (polyéthylènes) font partie des thermoplastiques parmi toutes les matières plastiques. C'est-à-dire qu'ils ont des propriétés qui leur confèrent une malléabilité à chaud et une thermo plasticité réversible. Mais ils sont de natures différentes selon les modes de polymérisation :

- ❖ À partir d'une méthode à haute pression, on obtient un polymère très ramifié appelé le polyéthylène basse densité PEBD.
- ❖ À l'inverse on utilise un procédé à basse pression pour obtenir le polyéthylène haut densité PEHD.
- ❖ Il existe par ailleurs un autre type de PE le PEMD (moyenne densité), mais c'est en réalité un intermédiaire entre les 2 formes et n'a pas de caractéristiques particulières ou intéressantes qui méritent d'être développée [18].

Les polyéthylènes sont classés en fonction de leur densité qui dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes sur les chaînes moléculaires. Il existe différents types de polyéthylène :

- PE-BD, polyéthylène basse densité.
- PE-BDL, polyéthylène à basse densité linéaire.
- PE- HD, polyéthylène haute densité.
- PE-UHPM, polyéthylène à masse molaire élevée.
- PE-R, polyéthylène réticulé.
- PE-RHD, polyéthylène réticulé à haute densité.
- PE-MD, polyéthylène à moyenne densité.
- PE-TBD, polyéthylène à très basse densité.

Le polyéthylène basse densité a été inventé en 1933 par les ingénieurs anglais E.W Fawcett et R.O Gibson. Le polyéthylène haute densité a été synthétisé en 1953 par le chimiste allemand Karl Ziegler et son équipe. Le polyéthylène à basse densité linéaire a été inventé pour remplacer le PE-BD en 1979 [19].

Tableau I.3 : Caractéristiques majeures des différentes familles des polyéthylènes [20].

Type de polyéthylène	Masse volumique (g/cm ³)	Taux de cristallinité (%)	Température de fusion (°C)	Température de transition vitreuse (°C)	Module d'Young en traction (MPa)
PEBD	0,915-0,935	41-58	95-117	-133 à -103	120-135
PEMD	0,930-0,945	55-65	125-130	–	350-800
PEHD	0,945-0,970	65-80	130-138	-120	800-1300

I.5.1. Polyéthylène à haute densité

Le polyéthylène à haute densité est un polymère thermoplastique de grande diffusion. Il fait partie de la famille de polyoléfines, au même titre de polyéthylènes basse ou moyenne densité, et le propylène. Les principales qualités de PEHD : résilience même à basse température, résistance aux produits chimiques, faible sensibilité à l'eau, imperméabilité à la vapeur d'eau, excellentes propriétés électriques, en font un matériau de choix dans les applications les plus variées comme l'extrusion-soufflage de corps creux, l'injection d'articles les plus divers, l'extrusion des films, tubes et câbles et autres... [21].

I.5.2. Histoire et développement

Les essais réalisés sur le polyéthylène révélèrent d'excellentes propriétés diélectriques et de haute résistance. Concrètement, sa résistance à l'eau en fait un parfait isolant pour les câbles sous-marins. Pendant la deuxième guerre mondiale, la majeure partie du polyéthylène fut utilisée pour isoler les câbles dans les installations radar. Pendant les années 50, de nouvelles techniques ont été développées pour la production de polyéthylène avec différents catalyseurs, Et conditions d'opération tel que des productions à basse pression, les systèmes développés furent :

- **Le procédé Standard** : Oil (procédé Zletz), basé sur l'emploi d'un catalyseur à l'oxyde de molybdène, maintenant il est abandonné.
- **Le procédé de Phillips** : utilise un catalyseur d'oxyde de chrome sur alumine de silice.
- **Le procédé Ziegler** : qui emploie un catalyseur de métal alkylo aluminium.

Le polyéthylène produit par les procédés précédemment cités, s'identifie comme polyéthylène linéaire ou polyéthylène à haute densité (PEHD). Comme son nom l'indique, le polyéthylène est essentiellement linéaire dans sa structure [22].

I.5.3. Caractéristiques du PEHD

- le polyéthylène PEHD est un matériau blanc ou coloré, conforme aux normes sanitaires FDA (naturel) et avec une bonne résistance aux produit chimiques.
- disponible dans un fini luisant ou autre, il se caractérise par sa rigidité, sa soudabilité et propriétés thermo formables.
- cette formulation de polyéthylène est reconnue pour sa stabilité [23].

I.5.4. Propriétés des polyéthylènes hauts densité

I.5.4.1. Propriétés physiques

La différence entre le PEHD et le PEBD est le point de ramollissement, puisqu'il se situe au-dessus du point d'ébullition de l'eau pour l'un et au-dessous pour l'autre. Les articles fabriqués, avec le polyéthylène de haute densité, peuvent ainsi être stérilisés à la vapeur [24].

I.5.4.2. Propriétés chimiques

Le polyéthylène possède une très bonne stabilité chimique :

- Inattaquable par les acides (sauf les oxydants), par les solutions de sels.
- Résistants aux solvants organiques au-dessus de 80°C.
- Pratiquement insoluble, à des températures inférieures à 60 °C.

- Sensible à la fissuration sous contrainte en présence de savon, alcools, détergents.
- Il refroidi lentement et plus cristallin et moins perméable aux solvants [23].

I.5.4.3. Propriétés électriques

Le PE présente d'excellentes propriétés d'isolation électrique quelles que soient sa masse moléculaire et sa cristallinité. Sa faible permittivité relative et son faible facteur de dissipation diélectrique font de lui un matériau de choix en isolation électrique [24].

I.5.4.4. Propriétés mécaniques

A 23°C, les matériaux semi-cristallins sont au-dessus de leur température de transition vitreuse (environ - 120°C) ; leur phase amorphe est caoutchouteuse, ce qui affecte leurs propriétés mécaniques [25].

I.5.5. Avantages et Inconvénients du PEHD

Les principaux avantages et inconvénients du polyéthylène haut densité ce présenté sur le tableau suivant :

Tableau I.4 : Les principaux avantages et inconvénients [26].

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Mise en œuvre aisée. - Excellentes propriétés d'isolation électrique - Résistance aux chocs - Grande inertie chimique. - Qualité alimentaire. - Perte du caractère perméable des PE que ce soit à l'eau, et aussi à l'air et aux hydrocarbures. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité aux UV en présence d'oxygène. - Sensibilité à la fissure sous Contrainte. - Mauvaise tenue à la chaleur. . - Collage important.

I.5.6. Domaines d'application du PEHD

Le PEHD doit répondre à plusieurs utilisations aux usages très variés on donne ici des exemples pour quelques applications : [27]

❖ Films :

- La sacherie.
- L'industrie : les emballages, films pour la construction.
- L'hygiène : couches-bébés.

- L'agriculture : serres, tunnels...

- ❖ **Objets moulés** : Dans le domaine des objets moulés, le polyéthylène haute densité s'est développé dans le secteur industriel : manutention, eaux, bouchonnage, et dans les applications techniques telles que le mobilier urbain.
- ❖ **Extrusion-soufflage** : Le domaine de l'extrusion-soufflage est réservé principalement au polyéthylène haute densité pour fabriquer des : bouteilles, flacons, bidon de lait, récipients pour lessive, détergents...
- ❖ **Tuyaux** : Dans l'application des tuyaux, le polyéthylène haut densité est employé pour la réalisation de tuyauteries de gaz, et pour les tuyaux sous pression, eau chaude, chauffage par le sol [25].

I .6. Renforts

C'est le principal porteur constitutif dans le composite (forme, volume). Il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté. Ces renforts permettent également d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont des propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité de mise en œuvre, un faible coût [10]. En fonction de leur utilisation, les renforts peuvent être d'origines diverses comme il est indiqué sur la **figure I.5**.

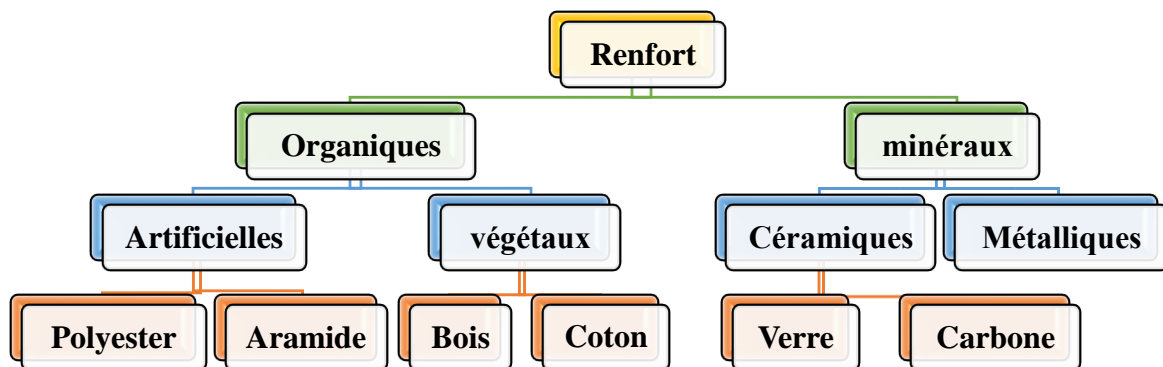


Figure I.5 : Les différents types de renfort de base [28].

I .6.1. Les fibres végétales

I .6.1.1. Définition

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales.

Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [29].

I .6.1.2. Classification des fibres végétales

Les fibres sont divisées en fonction de leur emplacement ou de leur extraction de la plante comme représenté sur **la figure I.6** :

- **Premièrement** (les fibres du phloème ou fibres molles). Ce sont des fibres que l'on trouve sur le marché des plantes en faisceaux dans la zone du poinçon de phloème. Le nombre de faisceaux fibreux varie selon le type de plante (15 - 35 faisceaux) et à chaque nombre de fibroblastes (10 - 40) et la longue cellule fusiforme Ciblant les deux extrémités, sa longueur est inférieure à 30 mm et sa largeur est inférieure à 30 microns. Les plantes les plus importantes de ce groupe sont : le jute, le lin, le chanvre, la ramie et le kénaf.
- **Deuxièmement** (les fibres de papier ou les fibres solides) les fibres se retrouvent comme un type de fibrose des faisceaux vasculaires de papier qui sont parallèles dans les feuilles qui prennent la forme longitudinale des rayures, comme les feuilles de palmier, les bananes ou les cactus.
- **Troisièmement** (Fibres de graines) Les fibres sont produites sous forme de saillies externes à la surface de la graine, comme le coton et le kapok.
- **Quatrièmement** (Fibres de fructification) Les fibres sont formées à l'extérieur du fruit sous forme de fibres de noix de coco.
- **Cinquièmement** (Fibres des tiges et des trônes) Ce sont des fibres moins importantes et sont généralement extraites des tiges et des trônes comme Paille de blé, Paille de riz, Paille d'orge.
- **Sixième** (Fibres ou tiges de bois) Les fibres extraites des tiges de palmiers et de certains arbres pour la fabrication de chapeaux et de sacs.

Les fibres sont également classées en fonction de leur teneur en humuscellulose (cellulose et hémicellulose) et en on peut distinguer les fibres de bois (dures et dures de matériaux ligneux

tels que le bois tendre et flexible de plantes non ligneuses. Les annuelles sont souvent relativement moins riches en lignines telles que : varech, chanvre, sisal, jute, jute et lin [30]. Les fibres végétales sont divisées en fonction de leur longueur et peuvent être regroupées en deux catégories : les fibres longues et les fibres courtes.

Les fibres longues, appelées fibres de phloème, proviennent des tiges et de l'écorce des tiges des plantes annuelles. Elles sont molles, tandis que les fibres des longues feuilles, des troncs d'arbres, des écorces de fruits, etc., sont plus solides car elles contiennent de grandes quantités de la lignine.

Les fibres courtes, ou fibres doubles, fibres cellulosiques attachées à de longues fibres [31].

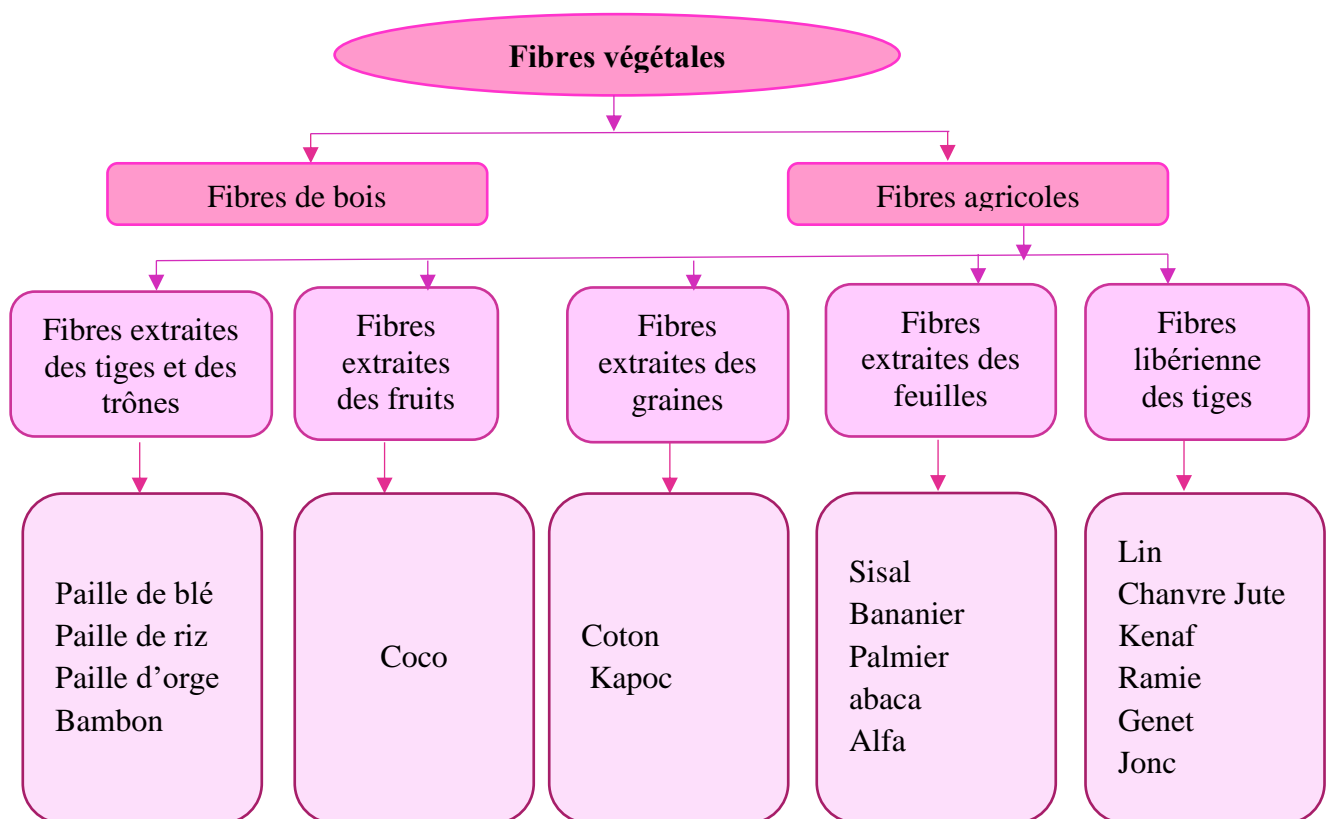


Figure I.6 : Classification des fibres végétales [32].

I.6.1.3. Composition chimique des fibres végétales

Les fibres végétales ont une formule chimique unique qui affecte grandement leur ténacité, en particulier dans les milieux basiques, cette composition chimique se compose principalement de trois composants : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, et leurs proportions varient d'une espèce à l'autre au sein de chaque fibre **tableau I.5**, les propriétés de chaque composant

contribuent à La propriété globale de la fibre, l'hémicellulose est responsable de la décomposition biologique, de l'absorption d'humidité et de la dégradation thermique des fibres [33]. La lignine agit comme une matrice qui encapsule la cellulose et constitue une structure très résistante.

En outre, il contient de petites quantités de protéines, d'extraits et de certains composés inorganiques.

Tableau I.5 : Composition chimique (%) des quelques fibres végétales [34].

Fibre	Cellulose (%)	Hémicellulose(%)	Lignine(%)	Pectine (%)	Cendre (%)
Coton	85-90	5,7	0,7-1,6	0-1	0,6
Lin	71	18,6-20,6	22	2,3	1,7
Chanvre	70-74	17,9-22,4	3,7-5,7	0,9	0,8
Jute	61,1-71,5	13,6-20,4	12-13	0,2	0,5
Ramie	68,6-76,2	13,1-16,7	0,6-0,7	1,9	0,3
Sisal	66-78	10-14	10-14	10	2
Alfa	45	24	24	5	2

a) Cellulose

La cellulose est le constituant principal des parois cellulaires des plantes. Elle est la substance naturelle la plus importante de la biosphère [35]. Et se trouve dans la paroi de la fibre, où elle joue un rôle protecteur. La cellulose est une grande partie qui consiste en une très longue chaîne organisée stéréoscopique composée de liaisons le glucose est sa formule chimique de forme $[(C_6 H_{10} O_5)]_n$ [36].

Sous la forme d'un bio polymère linéaire avec un degré de polymérisation très élevé supérieur à 1500. Il est constitué d'unités glucopyranoseanhydro interconnectées par des liaisons glucosidic **Figure I.7**. La forme répétitive est la dimère-cellulose.

Le nombre d'unités répétitives ou le degré de polymérisation varie en fonction de l'origine de la cellulose [37].

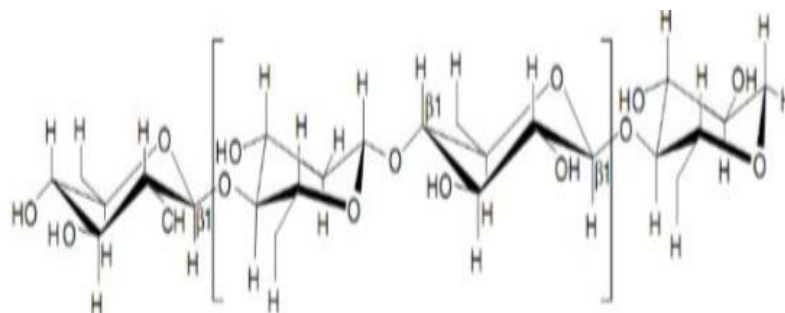


Figure I.7 : Structure chimique de la cellulose [38].

Il forme des microfibrilles à partir de cellulose et de nombreuses microfibrilles sont assemblées en fibrilles **figure I.8**. Plusieurs microfibrilles liées entre elles par des liaisons hydrogène forment une fibrille d'un diamètre de 3 à 5 nm et d'une longueur de 7 μm [39].

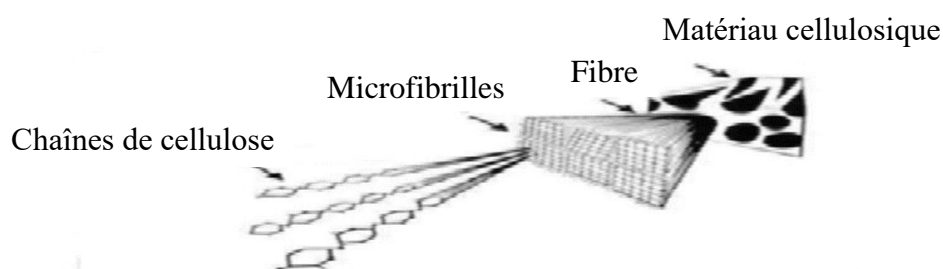


Figure I.8 : Représentation schématique de la hiérarchie de structure dans une fibre cellulosique [40].

b) Hémicellulose

L'hémicellulose, également connue sous le nom de polyose, est un polysaccharide qui forme une matrice de support pour la cellulose hydrophile présente dans la paroi des cellules végétales et qui peut être extraite par des solutions acides. Il se compose d'un groupe de sucres dont la chaîne linéaire principale est constituée de : (xylose, mannose, arabinose, galactose, glucose) contrairement à la cellulose qui ne contient que des unités de 1,4- β D-glucopyranose possède entre 50 et 300 degrés de polymérisation alors que le degré de cellulose d'origine est 10 à 100 fois plus élevé.

La structure chimique de l'hémicellulose varie en fonction de l'origine de la plante, de l'emplacement dans la paroi, du type de cellule ou même de l'âge du tissu [41].

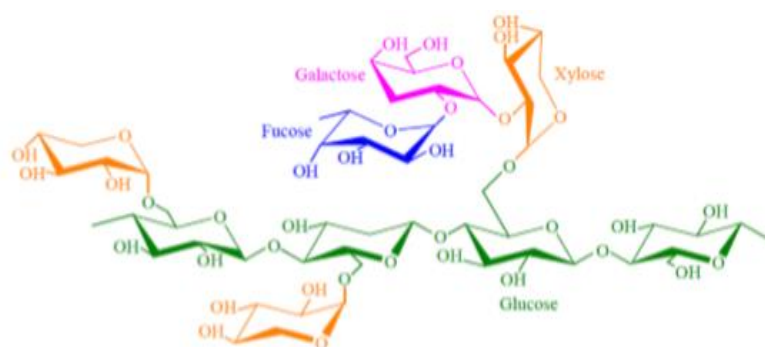


Figure I.9 : Structure chimique de l'hémicellulose [42].

c) Lignine

La lignine est un hétéro polymère complexe dont la composition varie selon l'origine et le type de plante et les conditions climatiques environnantes. La lignine contient des polymères phénoliques amorphes tridimensionnels avec trois unités différentes du type pseudo propane à savoir l'alcool coniférylique, l'alcool p -coumarylique et l'alcool cénapylique **figure I.10**.

La lignine est l'un des polymères naturels largement distribués à la surface de la terre après la cellulose, elle a un poids moléculaire élevé, elle est considérée comme une grosse molécule amorphe résistante à l'hydrolyse acide, soluble dans les solvants alcalins chauds, elle est oxydable et condensable avec les phénols, c'est un polymère thermoplastique (température de ramollissement $\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ et écoulement à $\sim 170\text{ }^{\circ}\text{C}$)[43].

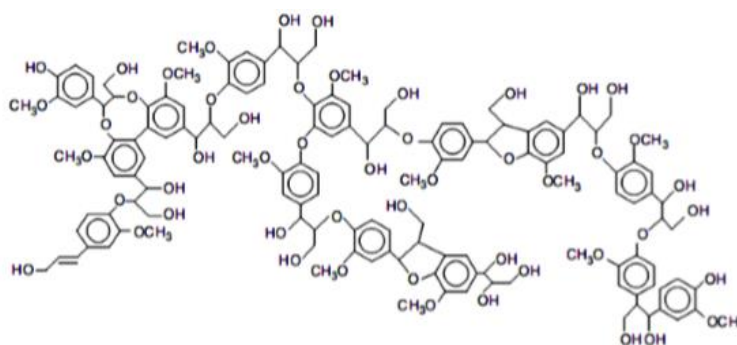


Figure I.10 : Structure de la lignine [44].

d) Pectine

Ce sont des polysaccharides cristallins hétérozygotes qui se forment dans la paroi cellulaire, constitués de paniers homogènes de chaînes linéaires de motifs anhydro-acide α -D-galacturonique, en conformation chaise, liés par liaison osidique en 1 \rightarrow 4. Ces chaînes sont plus

ou moins substituées par des groupements arabinanes ou arabinogalactanes fixés sur les motifs L-rhamnose qui s'intercalent entre les chaînes homogalacturoniques. Et comme il contient un pourcentage important d'acide D-galacturonique lié à un α (1 \rightarrow 4), ces fonctions acides lui confèrent une propriété poly-nucléique, très hydrophile [31].

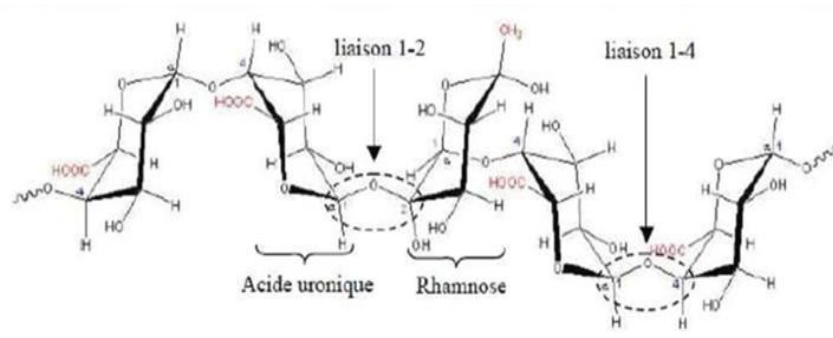


Figure I.11 : Structure d'une chaîne d'acide polygalacturonique et formation d'un coude par la présence de rhamnose [45].

e) Cires

Les cires appelées épicuticulaires sont des graisses présentes dans une fine couche qui recouvre la couche externe des surfaces aériennes de toutes les plantes. La couche de cire a de nombreuses fonctions telles que la protection des plantes contre les conditions environnementales et les attaques d'insectes, en plus de la cire plus chaude, la cire joue un rôle vital dans les réactions chimiques entre plantes et insectes, les graisses à la surface des plantes varient et diffèrent, et ils combinent les composés aliphatiques-cycliques sous la forme d'une longue chaîne. Parmi les groupes lipidiques connus, il existe des hydrocarbures, des esters de cire, des acides gras et des cétones, et il existe également un pourcentage plus faible de graisses diffuses telles que les cations hydroxy, les acides gras éthyliques, l'acide benzoïque et les esters méthyliques et d'autres véhicules [46].



Figure I.12 : Images de plante Alfa à région Driàat dans Hamam Al-Dalaa.

I.7. Alfa

I.7.1. L'historique

L'alfa n'est pas inconnu des papetiers car les Anglais l'utilisent depuis de nombreuses années. Le premier brevet britannique sur l'utilisation et le traitement de l'alfa date en effet du 19 novembre 1839. L'alfa est également à l'honneur lors de la grande exposition de Londres en 1851. Toutefois, c'est surtout à la suite des travaux de Thomas Routledge (31 juillet 1856) que les anglais systématisent son utilisation permettant ainsi la fabrication de papiers de grande qualité et de grande renommée [47].

La connaissance approfondie de cette graminée a préoccupé depuis longtemps plusieurs chercheurs, son étude, sa biologie et son écologie ont attiré l'attention de TRABUT dès 1889 (KHELIL en 1995 et LAKHDARI en 2002) [48].

I.7.2. Définition

Le nom latin d'Alfa est *Alliés*, ce n'est pas une plante cultivée, mais plutôt une plante herbacée vivace et spontanée largement répandue dans les régions arides et montagneuses et les hauts plateaux. Le **tableau I.6** illustre les superficies occupées par l'Alfa dans ces différentes payées. Elle pousse en touffes atteignant un mètre de haut **figure I.12**, utilisée dans de nombreuses industries, comme les cigarettes, ou l'utilise aussi pour la fabrication du papier et les industries traditionnelles. C'est une essence très robuste, raide, sèche très persistante.

Tableau I.6 : La répartition de la plante d'Alfa [43].

Région	Algérie	Tunisie	Lybie	Maroc	Espagne
L'air (ha)	4.000.000	600.000	350.000	3.186.000	300.000

I.7.3. Nomenclature et classification botanique

Nom vulgaire : L'alfa, en anglais Esparto, Nom scientifique : *Stipa tenacissima* L.

Classification [49]	
Règne	Plantae
Sous règne	Tracheobionta
Super Division	Spermatophyta
Classe	Liliopsida
Ordre	Poales
Famille	Poaceae
Genre	<i>Stipa</i> L.
Espèce	<i>Stipa tenacissima</i> L.

I.7.4. La morphologie et structure de fibre Alfa

La plante d'Alfa comprend une partie souterraine et une autre aérienne, la partie souterraine appelée le Rhizome est formée d'un réseau complexe de racines très ramifiées de 2 mm de diamètre et profondes de 30 à 50 cm qui se terminent par les jeunes pousses **figure I.13**.

La partie aérienne est constituée de plusieurs branches portant des gaines emboîtées les unes dans les autres, surmontées de limbes longs de 30 à 120 cm, la face inférieure des limbes est légèrement brillante et la face supérieure porte de fortes nervures, l'une et l'autre sont recouvertes d'une cire isolante qui permet à la plante de résister à la sécheresse [50].

La tige est creuse et cylindrique régulièrement interrompue au niveau du nœud par des enchevêtrements des faisceaux, au même niveau se trouvent des bourgeons qui donneront naissance soit à un entre nœud soit à une tige ou reste sous la forme d'une réserve qui entrera en activité lorsque la souche sera épuisée, les feuilles sont cylindriques très tenaces, longues de 50 à 60 centimètres, la fleur est protégée par deux glumes de longueur égale la glumelle supérieure semble partiellement séparée en deux parties et la glumelle inférieure est plus fine, généralement les fleurs apparaissent vers la fin d'avril début mai et sont de couleur verte, le fruit est un caryopse (une sorte de grain) qui mesure 5 à 6 mm de longueur, sa partie supérieure est brune et porte souvent des traces desséchées [51].

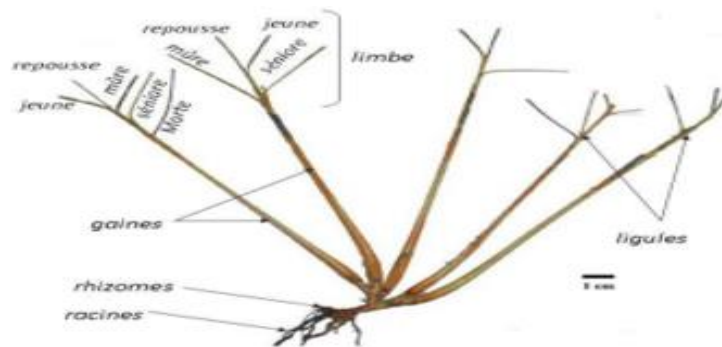


Figure I.13 : Morphologie de la plante d'alfa.

La floraison a lieu à partir de la fin du printemps et durant tout l'été, cette espèce est hermaphrodite (présentant les 2 sexes sur la même fleur), la pollinisation se fait de manière entomogame c'est-à-dire que le pollen est véhiculé par des insectes et la dissémination des graines se fait par anémochorie (le mode de dispersion des graines des végétaux se faisant grâce au vent) [52].

I.7.5. La composition chimique de fibre Alfa

La composition chimique approximative de l'alfa est la suivante : La cellulose (44 - 47%), L'hémicellulose (22 - 35%), la lignine (19 - 24%) et les cendres (2 - 5%). La plante est plutôt une grande herbe dure avec une grande tige possédant ramifications et des feuilles [53].

I.7.6. Domaines d'applications

Les applications de l'Alfa sont multiples et diversifiées, et peuvent être classées en 2 catégories selon la nature de la matière :

➤ Les tiges de l'Alfa

Applications artisanales : Ces tiges, une fois filées ou tressées, s'emploient pour la fabrication de cordages et d'objets de sparterie (tels que : des tapis, des paniers, des paillassons, des plateaux, des ficelles ...). L'utilisation artisanale par les riverains qui habitent dans les régions alfatières peut être évaluée à 50 kg/ménage/an **figure I.14**.

Pâturage : Les nappes alfatières constituent un espace pastoral de réserve tant pour le bétail (boeufs, moutons, chameaux...) que pour la faune sauvage (gazelle...). Du fait qu'elle est relativement délaissée par les animaux en présence d'autres ressources pastorales plus appétentes, vu sa faible valeur alimentaire, elle constitue un énorme stock qui permet la survie des animaux pendant les années de disette.

Combustible : Le pouvoir calorifique supérieur de l'alfa varie de 4666 Kcal/kg pour les brins de 1 an et de 5160 et 5163 Kcal/kg pour les brins âgés de 2 ans et de 3 ans respectivement, ce qui lui confère un usage énergétique important sous forme de briquettes combustibles en remplacement ou d'appoint au bois de feu [43].



Figure I.14 : Des exemples d'artisanat Alfatière (des paniers, des paillassons, des espadrilles...)

➤ Les fibres de l'Alfa

La pâte à papier : À la fin du 19^{ème} siècle le papier d'alfa est apparu, c'est un papier de bonne qualité qui met bien en évidence la valorisation de cette plante et lui donne une grande importance économique, la pâte à papier représente la branche qui consomme le plus d'alfa (la Société Nationale de Cellulose et de Papier Alfa (SNCPA – Tunisie) produit 25.000 tonnes de papier et 12.000 tonnes de pâte par an) **figure I.14 [54]**.

Non tissés : Des travaux ont été effectués afin de remplacer des fibres de verre et de carbone, qui ont un coût élevé influençant le prix de revient du produit fini. Les non tissés sont utilisés comme couche de renfort pour des emboitures dans le domaine orthopédique par exemple **[54]**.

I .8. Le liège

I .8.1. Histoire Du liège

Le liège est l'écorce du chêne-liège (*Quercus Suber L*), un arbre noble possédant des caractéristiques très spéciales qui croît dans les pays qui entourent le bassin méditerranéen (Espagne, Italie, France, Maroc, Algérie et Portugal) **figure I.15**, où il est apparu il y a plus de 60 millions d'années le liège est un produit végétal tiré du tissu phellogène ou de l'assise subéreuse **[55]**. Il est formé de cellules mortes aux parois surédifiées. Il protège les parties vivantes du tronc et des branches de l'arbre. Il existe en quantité limitée dans de nombreuses espèces, et il n'y a qu'une seule essence qui fournit une quantité telle, qu'elle justifie le nom qu'elle porte « *Quercus suber*, le chêne liège » originaire des terres bordant le bassin méditerranéen proche du hêtre et du châtaigner **[56]**.



Figure I.15 : Le Chêne liège dans le monde.

I .8.2. Définition

Le liège est un tissu végétal formé de cellules mortes aux parois surédifiées qui protègent les parties vivantes du tronc et des branches du chêne-liège. Le liège est le résultat de la croissance

en diamètre de l'arbre. Il se développe à partir de l'assise subéro-phellodermique, assise génératrice plus couramment appelée la mère [57].

I.8.3. La formation du liège

La croissance en diamètre de la tige de chêne-liège résulte de deux assises génératrices de cellules, dont une que l'on nomme « phellogène », « mère du liège » ou plus scientifiquement « assise subérophellodermique », située entre le liège et le liber. L'assise subérophellodermique produit vers l'extérieur le liège et vers l'intérieur le phelloderme ; l'assise libéro-ligneuse (aussi appelée cambium) produit quant à elle vers l'extérieur le liber (chargé de transporter la sève élaborée) et vers l'intérieur le xylème ou bois (chargé du transport de la sève brute). Après un écorçage, la « mère » ainsi découverte se dessèche en partie pour former une croûte et se reforme plus en profondeur par différenciation des cellules du liber (FFL) (Fédération Française du Liège) **figure I.16**.

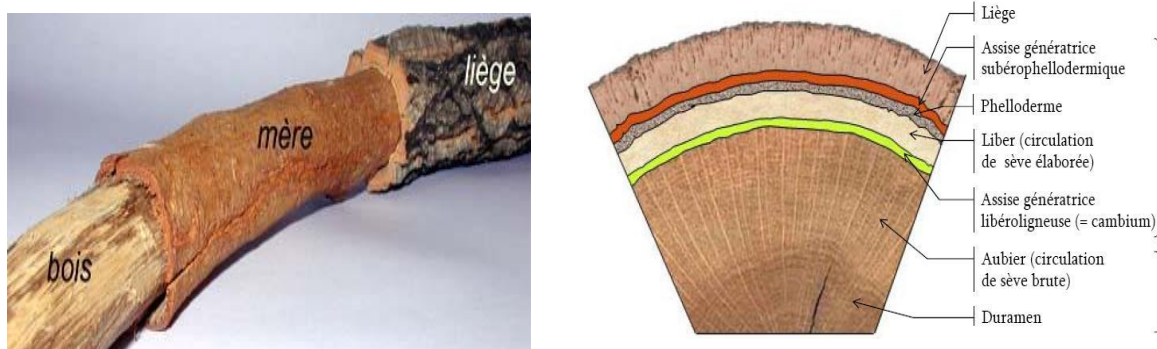


Figure I.16 : Formation du liège.

I.8.4. Les types de liège

On distingue le liège mâle et liège femelle :

I.8.4.1. Le liège mâle

C'est le liège qui se développe naturellement sur le tronc et les branches de l'arbre. Il est susceptible d'atteindre une forte épaisseur (jusqu'à 25 ou 30 cm sur de très vieux individus jamais exploités), mais il se crevasse fortement en vieillissant, devient compact, siliceux, dépourvu d'élasticité, ce qui ne permet pas de l'utiliser pour fabriquer des bouchons. Ce liège doit être destiné à la trituration et n'a donc que peu voire pas de valeur. Il peut être retiré de l'arbre lorsque ce dernier a atteint une circonférence d'environ 70 centimètres à 1,30 mètres du sol, c'est à dire à un âge compris entre 30 et 40 ans, lors de l'opération appelée démasclage (IML) (Institut méditerranéen du liège).

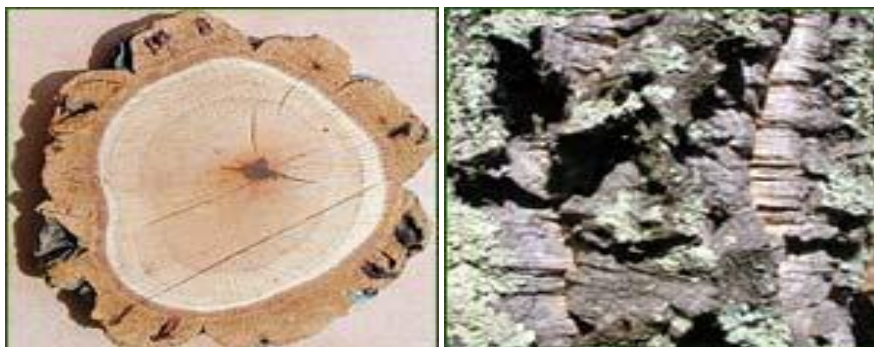


Figure I.17 : Le liège mâle (IML).

I.8.4.2. Le liège femelle (de reproduction)

C'est une nouvelle écorce liégeuse, plus régulière, plus homogène, plus élastique et moins crevassée appelée liège de première reproduction, qui sera de meilleure qualité mais ne pourra pas toujours être utilisée pour les usages les plus nobles à cause notamment de sa croûte souvent trop épaisse et crevassée. Ce liège doit avoir une épaisseur d'au moins 30 mm pour être exploitable, ce qui est atteint après une période variable, allant de 9 à 15 ans, selon divers facteurs tels que le climat, le sol ou le génotype de l'individu. Ce n'est qu'à l'écorçage suivant que l'on obtiendra du liège de deuxième reproduction, de meilleure qualité et donc de meilleure valeur marchande. La qualité des lièges est ensuite croissante puis elle finit par diminuer au fur et à mesure que l'arbre vieillit : un chêne-liège peut ainsi subir entre 12 et 15 écorçages au cours de sa vie (IML).



Figure I.18 : Liège femelle (de reproduction) (IML).

I.8.5. La composition chimique du liège

Il n'est jamais superflu de rappeler les propriétés uniques qu'il soit naturel ou artificiel, n'a jusqu'à nos jours pu égaler : Léger, incombustible, imperméable aux liquides et aux gaz, élastique et compressible, excellent isolant thermique et acoustique, 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 micro cellules, ayant en général une forme polyédrique.

Dans un centimètre cube de liège résulte de deux assises génératrices de phelloderme, mère de liège ou plus scientifiquement le liège et vers l'intérieur le libéro-ligneuse (aussi appelée cambium) produit quant à elle vers brute) **figureI.19** du liège qu'aucun autre produit, 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 [58] :

- La subérine (45 %), composant principal des parois de la cellule, responsable de la résilience du liège.
- La lignine (27 %), composé « structurant » des parois cellulaires.
- Les polysaccharides (cellulose et hémicellulose) (12 %), composants des parois des cellules et donnant au liège sa texture.
- Les tanins (6 %), composants polyphénoliques à l'origine de la couleur du liège.
- Les céroïdes (6 %), composants hydrophobes donnant au liège son imperméabilité.
- On retrouve également de l'eau, de la glycérine ainsi que divers ingrédients à hauteur de 4%.

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.

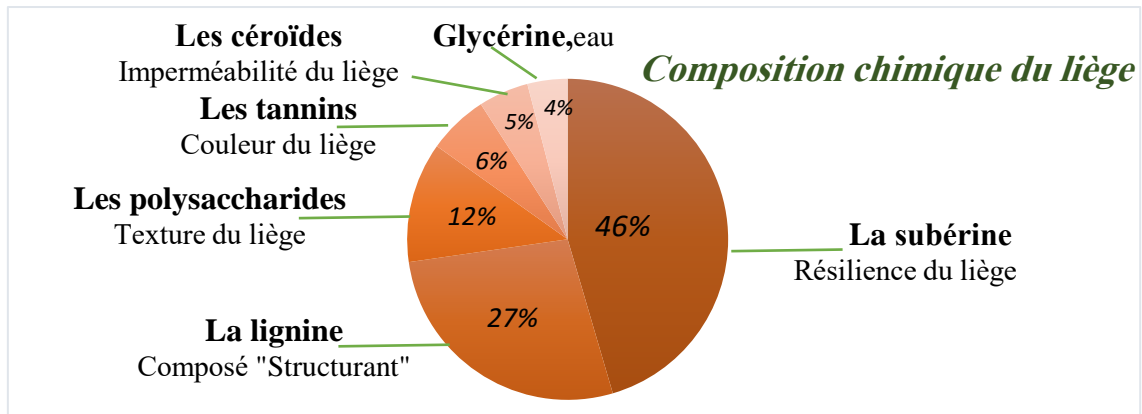


Figure I.19 : La composition chimique du liège

I.8.6. Morphologie du liège

Le liège a une capacité remarquable à créer du tissu subéreux à partir de son écorce interne. Ce tissu, formé spécifiquement par le phellogène du chêne-liège (le tissu responsable de la formation de nouvelles cellules), tire son nom du latin *suber* (liège). Le cycle de vie du chêne-liège produit trois qualités de tissu subéreux, à savoir, le liège vierge ; reproduction du liège du deuxième décapage et le liège de reproduction des bandes suivantes. Le liège agit comme une barrière entre l'atmosphère, le cortex et le tronc du chêne liège. Les lenticelles servent de canaux de transfert de masse pour l'eau et les gaz [62]. Le tissu phellogène du chêne-liège est actif tout au long de la vie de l'arbre. Les membranes cellulaires formées sont très minces, dépourvues de lignes de communication d'une cellule à l'autre et sont principalement formées par la subérine, la lignine et la cellulose [63,64].

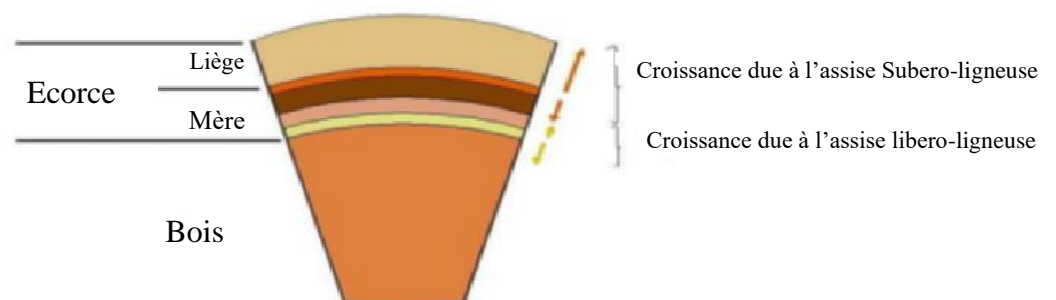


Figure I.20 : Représentation schématique de la section axiale du chêne-liège [65].

Les effets de l'extraction du liège sur l'arbre incluent une perte accrue d'eau de la surface exposée, ce qui peut entraîner une diminution de l'activité stomatique [59 -62] (réduction de l'activité biologique de l'arbre) et la mort des tissus d'écorce interne, nouvellement exposés, avec formation subséquente d'un péri derme traumatique à partir d'environ 30 jours après

l'extraction du liège. La croissance des arbres (bois) est également affectée par l'extraction du liège avec une diminution considérable de la largeur des anneaux et une anatomie perturbée [60,66]. Dans le chêne-liège, la croissance radiale et axiale commence simultanément au début du printemps. La chute des feuilles se produit au début du printemps et à nouveau en automne si les conditions environnementales le permettent [67-69]. L'extraction du liège se fait lorsque la croissance est la plus élevée (été), lorsque le phellogène est en pleine activité méristématique permettant une séparation facile des couches de liège.

I.8.7. Utilisation de liège :

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 liège aggloméré, **figures I.21 et I.22**.

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 (IML) (Institut méditerranéen du liège). Les produits, après transformation, sont principalement destinés aux activités industrielles suivantes [70] :

- La construction en général (isolation thermique et acoustique, revêtement, décorations, cloisons, etc).
- L'industrie du froid (chambres froides et transports frigorifiques).
- La construction navale (isolation, revêtement, décoration, etc).
- L'industrie de l'automobile et mécanique en général (joints d'étanchéité, etc).
- L'industrie des transports (isolation thermique, acoustique et vibratoire).
- 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, etc).
- L'industrie de la chaussure (semelles, talons, etc).
- L'industrie des emballages (granulés et laine de liège).
- La fabrication d'articles de sport (articles de pêche, raquettes, panneaux, balles, etc).
- La chasse (bourre de cartouches).
- La fabrication d'articles de maison (nappes, boîtes de rangement, cadres, divers matériels de bureau, etc).

- La musique (isolant phonique particulièrement performant dans les basses et moyennes fréquences ; cette utilisation nécessite des planches de liège de tout première qualité).
- La cristallerie (pour ses propriétés abrasives).



Figure I.21 : Bouchon liège naturel.



Figure I.22 : Bouchon colmaté, aggloméré.

I.9. Adhésion de l'interface

I.9.1. Notion d'adhésion

L'adhésion est un phénomène complexe consistant en la formation de contacts interfaciaux entre différents composés au niveau moléculaire. Les molécules se déplacent alors pour atteindre l'équilibre d'adsorption en formant des liaisons physiques, qui forment plus ou moins des liaisons covalentes selon leur nature et/ou leurs réactions chimiques. Par conséquent, l'adhésion est affectée par le mouillage, la diffusivité, adsorption, réactivité chimique, et peut aussi être d'origine mécanique [71].

L'adhésion entre la matrice et le renfort est le point le plus important au niveau des caractéristiques des matériaux composites. Le manque d'adhésion entre les deux constituants est une difficulté qui peut limiter l'usage des fibres naturelles dans les composites.

Ce phénomène est lié au caractère hydrophile et polaire des fibres naturelles, qui sont incompatible avec les polymères hydrophobes et apolaires [72].

L'adhésion interfaciale est une combinaison de trois phénomènes qui fonctionnent simultanément à différents degrés :

- ❖ Interpénétration mécanique.
- ❖ Adhésion physique moléculaire.
- ❖ Adhésion chimique [73].

I.9.2. Interface fibre/matrice

Interface fibre/matrice sont le siège de phénomènes physicochimiques 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 [74].

Les fibres naturelles bien qu'elles possèdent de nombreuses qualités présentent certains défauts majeurs lorsqu'il s'agit de les associer aux polymères thermoplastiques. Elles possèdent une forte affinité avec l'eau (caractère hydrophile fort), ce qui crée une incompatibilité d'interfaces entre les fibres et les thermoplastiques à caractère fortement hydrophobe. Compte tenu de cette incompatibilité et des problèmes qui en découlent, il est apparu nécessaire de mettre au point des solutions, via l'usage de traitements ou d'additifs [75].

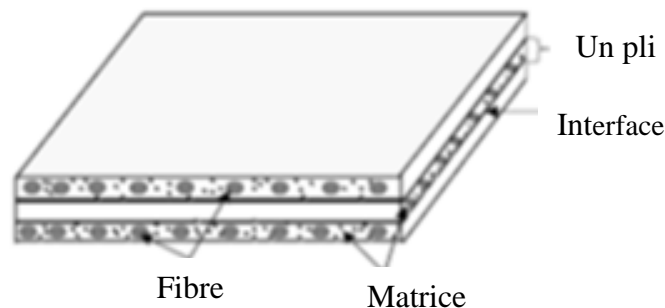


Figure I.23 : Interface fibre matrice [76].

I.9.3. Modification des interactions à l'interface

Ils existent deux principales méthodes de modifications de surface : les méthodes physiques et les méthodes chimiques. Elles diffèrent suivant qu'elles changent les propriétés de surfaces ou par le changement de la structure des surfaces [77].

I.9.3.1. Les méthodes physiques

Les méthodes physiques ont la particularité de ne pas modifier la composition chimique de la fibre cellulosique. Les traitements physiques modifient les propriétés structurales et de surface de la fibre et influencent ainsi les liaisons avec les polymères [75,78]. Parmi ces méthodes, on peut citer :

- **Les traitements par décharges électriques (corona, plasmas froids)**

Le traitement corona est une technique qui permet l'oxydation et l'activation de la surface des fibres, il a pour le rôle de modifier l'énergie de la surface des fibres végétales [79].

- **Le traitement plasma**

Le traitement plasma a pour rôle de modifier les surfaces des fibres par altération ou élimination des couches de surface faiblement attachées tout en formant de nouveaux groupes fonctionnels [79].

- **Les agents dispersifs**

D'autres techniques de traitement physique existent, comme l'irradiation par Ultraviolet, la mercerisation et le traitement à l'ozone. L'ensemble de ces méthodes propose une gamme de solutions plus ou moins faciles à mettre en œuvre. Les agents dispersifs et additifs sont les plus largement répandus dans le domaine des composites WPC (Wood Plastic Composite) grâce à leur facilité d'application [79].

I.9.3.2. Les méthodes chimiques

La modification de la surface par des méthodes chimiques a pour objectif de rendre compatibles deux matériaux par l'introduction d'un troisième aux propriétés intermédiaires. Le couplage réalisé permet l'association des fibres-cellulosiques fortement hydrophiles avec des polymères hydrophobes [80]. Parmi ces méthodes, on peut citer :

- ❖ **Couplage chimique**

C'est l'une des méthodes de modification chimique des fibres la plus importante. Son principe repose sur l'utilisation d'agents de couplage qui permettent de former un pont chimique entre la fibre et la matrice. Les agents de couplage se classent en trois grandes catégories : les organiques, les inorganiques et les organiques-inorganiques [80].

- ❖ **Les agents de couplage organiques**

Sont les plus utilisés pour les produits à base de bois. Ceux qui sont employés dans les WPC disposent dans leurs structures moléculaires de multifonctionnel [81].

- ❖ **Les agents de couplage inorganiques**

Classés comme agents de couplage, toutefois, ils sont nettement moins importants dans les composites WPC. Les silicates permettent par exemple de créer une certaine compatibilité entre la fibre de bois et le polymère [81].

- ❖ **Les agents de couplage organiques-inorganiques**

Sont des composés à structure hybride dont la fonctionnalité organique régit l'efficacité de couplage. Les silanes et titanates ont été employés dans le WPC. En particulier, les silanes ; qui sont généralement dévolus aux composites renforcés avec des fibres de verre, agissent comme

un agent dispersif mais leur couplage permet aussi d'améliorer la stabilité thermique ou dimensionnelle de certains composites WPC [81].

❖ **Traitement par benzylation**

La benzylation est une transformation principale en synthèse organique [82]. La formation des liaisons ester est conduite par l'inclusion du groupement benzoyle sur les fibres naturelles, ce qui réduit le caractère hydrophile de la fibre et le rend plus compatible avec la matrice [83,84].

❖ **Traitement par la soude (NAOH)**

Le traitement à la soude ou mercerisage est l'un des traitements chimiques les plus utilisés avec les fibres naturelles lorsqu'elles sont utilisées pour renforcer les thermoplastiques et thermodurcissables [85-87]. La mercerisation est un traitement alcalin. Elle dépend de la concentration de la solution alcaline, de la température et du temps de traitement [88].

I.10. Application des composites à base des fibres végétales

Les matériaux composites de nos jours prennent une place prépondérante dans différents domaines de par leur simplicité d'élaboration, leur légèreté ainsi que leurs caractéristiques mécaniques. Contrairement aux matériaux classiques qui présentent des caractéristiques mécaniques intrinsèques, les matériaux composites peuvent répondre aux exigences des différents types de contraintes à partir d'une élaboration et d'un choix judicieux de matrice et renfort, et ceci, dans différents domaines :

- Électricité et électronique, Bâtiment et travaux publics.
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire).
- Santé (instrumentation médicale) [16].



Figure I.24 : Application des matériaux composites à base de fibres naturelles.

I.11. Avantages et inconvénients des matériaux composites

➤ Inconvénients

- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- Sensibilité aux agents atmosphériques (eau, rayons UV, humidité, température...).
- Difficulté à réparer.
- Matériaux très sensibles à la chaleur.
- L'augmentation des déchets qui en résultent et difficulté d'élimination ou de recyclage.

➤ Avantages

- Intégration de fonctions des composants élémentaires (propriétés améliorées).
- Longue durée de la vie.
- L'adaptabilité.
- Absence de corrosion.

- Tenue aux agents chimiques (résistance chimique).
- Résiste au feu.
- Gain de masse (la réduction du poids).
- Grande résistance à la fatigue.
- Très bonne légèreté et souplesse.
- La possibilité de fabriquer des grandes ainsi que des petites pièces sous différentes formes (formes complexes).
- Peut être utilisé dans un large éventail d'applications.
- Résistance élevée aux chocs [89,90].

Références bibliographiques

- [1] P. JACQUINET, « Utilisation des matériaux composites ». Paris : Hermès, pagination Multiple, **1991**.
- [2] Z. MASSOT, « Synthèse de matériaux composites par co-broyage en voie sèche : Caractérisation des propriétés physico-chimiques et d'usages des matériaux ». Thèse Doctorat, Toulouse : Institut National Polytechnique de Toulouse, **2004**.
- [3] JM. Berthelot, « Matériaux composites/comportement mécanique et analyse des structures ». 4ème édition, Paris : Lavoisier, **2005**.
- [4] B. RINGUETTE, « *Matériaux composites à base de fibres de chanvre* ». Mémoire de maître ès sciences, Québec : Université de Laval, **2011**.
- [5] MF. Ashby et DR. H. Jones, « Matériaux, t. Microstructure et mise en œuvre ». Chap. 25, Dunod, **1991**.
- [6] A. BOUDENNE, « Étude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère ». Thèse Doctorat, Créteil : Université Paris XII – Val de Marne, **2003**.
- [7] X. Li, L. Tabil, S. Panigrahi, « Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review ». Journal of Polymers and the Environment, 15, 25-33, **2007**.
- [8] S. Sreenivasan, P. Bhamalyer, K. R. Krishna Iyer, « Influence of delignification and alkali treatment on the fine structure of coir fibres ». Journal of Materials Science, **vol. 31**, pp. 721-726, **1996**.
- [9] P. Jaquinet, « Utilisation des matériaux composites ». Edition Hermès, paris, **1991**.
- [10] CH. Aribi, « Etude comparative du comportement des différents matériaux composites (différentes matrices) ». Thèse de Doctorat, Université de M'hamed Bouguera, Algerie, **2012**.
- [11] J. Livage, M. Henry and C. Sanchez, « Sol-gel chemistry of transition metal oxides ». Progress in Solid State Chemistry, **vol.18**, p.259, **1988**.
- [12] H. Schmidt, « New type of non-crystalline solids between inorganic and organic materials ». Journal of Non-Crystalline Solids, **Vol.73**, **1985**.

- [13] J. Porque, « Développement de dispositifs optiques intégrés à base de matériaux organiques-inorganiques ». Thèse de Doctorat, Université Montpellier 2, **1998**.
- [14] A. Mokhtar, « Modélisation du comportement et de l'endommagement des composites à matrice thermoplastique ». Thèse de Doctorat en Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, **2016**.
- [15] R. Harry, « Les matériaux composites ». Laboratoire de Génie Mécanique, Toulouse : France **2009**.
- [16] L. Berreur, B. de Maillard, S. Nösperger, « Etude prospective stratégique sur les matériaux composites ». L'industrie française des matériaux composites, **2002**.
- [17] F. Michel et G. Yves, « Chimie et Physico-chimie des Polymères ». 2e et 3e cycles, Dunod. Paris, 4-8, **2005**.
- [18] F. Michel, G. Yves, « Organic and physical chemistry of polymers ». John Wiley and Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, **2008**.
- [19] J. CAZENAVE, « Le comportement rigidité/durabilité du polyéthylène haute densité en relation avec la structure de chaîne, la microstructure et la topologie moléculaire issues de la cristallisation ». Thèse de Doctorat, Ecole doctorale matériaux de Lyon, **2005**.
- [20] K. BOURAI, « Étude du comportement thermique d'un composite bois-polymère pour une application en roto moulage ». Mémoire de maîtrise, Université Laval, Canada, **2010**.
- [21] R. DOSSOGNE, « Technique d'ingénieur, traité plastique et composites ». **2007**.
- [22] S. SOFIANE, « Contribution à l'étude expérimentale d'un polyéthylène à haute densité (PEHD) – Effet de la température et de la vitesse de déformation ». Thèse de Magister, Université BADJI MOKHTAR, Annaba, **2007**.
- [23] J-P. Trotignon, J. Verdu, A. Dobraczynski et M. Piperaud, « Matières plastiques : structures-propriétés, mise en œuvre, normalisation ». Livre De Matières Plastiques, ensam, paris, **2006**.
- [24] M. Fontanille, P. Vairon, « Polymérisation ». Techniques De L'ingénieur, Traité Plastiques et Composites, **2009**.
- [25] M. Carrega et C. Dunod, « Matériaux Polymères ». 2e édition. Dunod, Paris, **2007**.

- [26] « Connaissance de polyéthylène ». Documentation technique de la société ELF ATCHEM, octobre **1995**.
- [27] U.h. Nilsson, R.C. Dammert, A. Campus, A. Sneek, H. J. Jansson, « Morphology of Polyethylene for Power Cable Insulation: Effects Of Antioxidant And Crosslinking, Ie, International Conference On Conduction And Breakdown In Solid Dielectrics ».Vasteras Sweden,Pp. 365-367, **1998**.
- [28] A. AL-Maghribi, « Comportement des matériaux composites à fibres courtes : applications à l'impact basse vitesse ». Thèse de doctorat, l'université Paul Sabatier, **2008**.
- [29]<https://www.textileschool.com/amp/2632/linen-fiber-from-flax-plants-and-the-linenfabrics>.
- [30] F. Michaud, « Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : aptitude au postformage ». Université Laval, **2003**.
- [31] A.Y. Nenonene,« Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bio adhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage ». Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, **2009**.
- [32] J.E.G.Van Dam et H.L. Bos, « Consultation sur l'impact environnemental des fibres naturelles dans les applications industrielles ». Congrès de Food and Agriculture Organisation (FAO), Rome, **2004**.
- [33] G. Aliprandi, « Matériaux réfractaires et céramiques techniques ». Édition SEPTIMA, Paris, France, pp. 489-519,**1989**.
- [34] S. Taj, M. Ali Munawer, S.Khan « Natural fibre-reinforced polymer composites ». Proceedings of Paktistan Acadmy of Sciences, **Vol.44** (2), Mars **2007**.
- [35] J.M. Béguin, G. Rotman, A. Bentolila, and B. Baroin, « Les matériaux composites. Dynamisme et innovation ». Ministère de l'Economie, des Finances et de l'industrie, **2002**.
- [36] A. Laichaoui, « Analyse expérimentale du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites ». Mémoire de magister : Génie Civil : Alger, Ecole Nationale Polytechnique, **2006**.
- [37] R. Harry, « Les matériaux composites ». Laboratoire de Génie Mécanique, Toulouse : France, **2009**.

- [38] B. Wang, S. Panigrahi, L. Tabil, W. Crerar, T. Powell, M. Kolybaba, S. Sokhansanj, « Flax fibre-reinforced thermoplastic composites ». CSAE/ASAE annual intersectional meeting, Fargo, North Dakota, USA, **2003**.
- [39] E. Jao Jules, « Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis diélectrique ». Thèse de Doctorat, L'école nationale supérieure d'arts et métiers Paris Tech, **2001**.
- [40] N. Haddadou, « Etude du comportement mécanique en statique des matériaux composites stratifiés en flexion 3 points ». Boumerdes, Université de M'hamed Bougara, Faculté des sciences de l'ingénieur, **2004**.
- [41] V. V. Do Thi, « Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non ». Thèse, Université de Grenoble ; Université des Sciences Naturelles d'Ho Chi Minh Ville, **2011**.
- [42] T. SURINI, « Analyse Dynamique de la Biodégradation du Bois et de Composites à Base de Bois et Fibres Végétales ». Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, **2009**.
- [43] « L'alfa : Importance écologique et socio-économique ». Portail de l'agriculture marocaine, Terre et Vie, N°61-62, **2002**.
- [44] S. THIEBAUD, « valorisation chimique de composés lignocellulosiques : obtention de nouveaux matériaux ». Thèse de doctorat, L'Institut National Polytechnique de Toulouse, **1995**.
- [45] D. Sedan, « Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment : influence sur les propriétés mécaniques du composite ». Thèse de Doctorat, Université de Limoges, **2007**.
- [46] D.E. AIZI, « Extraction, caractérisation morphologique, physico-chimique et mécanique des fibres caulinaires de Retama monosperma L.Boiss ». Thèse de Doctorat. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, **2016**.
- [47] A. Lallam, « Extraction et étude des propriétés physiques et mécaniques des fibres d'Alfa (E Spartogross) en vue d'applications textiles ». **2010**.

- [48] M. Abdellah Zakaria, « Contribution à l'étude édaphique des formations à alfa dans la commune de Mâamora (Saida) ». Mémoire Master en Ecologie et Environnement, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen (UABT), **2014**.
- [49] USDA Plants Database
- [50] M. Benchrik et S. Lakhdhari, « Contribution à l'étude de l'entomofaune de la nappe alfatière de la région de Zaafrane .W. Djelfa ». Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en agropastoralisme, Centre Universitaire ZIANE ACHOUR Djelfa, **2002**.
- [51] D. Nedjraoui, « Adaptation de l'alfa (*Stipa tenacissima* L) aux conditions stationnelles ». Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la technologie Houari Boumediene USTHB, Alger, **1990**.
- [52] A. Moulay, K. Benabdeli and A. Morsli, « Contribution a l'identification des principaux facteurs de dégradation des steppes a *Stipa tenacissima* du sud-ouest Algérien ». *Mediterranea*, Série d'estudios biológicos época II, n° 22, Universidad de Alicante, **2011**.
- [53] A. Mabrouk, H. Kaddami, S. Boufi, F. Erchiqui, A. Dufresne, « Cellulosic nanoparticles from alfa fibers (*Stipa tenacissima*) : extraction procedures and reinforcement potential in polymer nanocomposites ». *Cellulose*, **2012**.
- [54] M. Ben Hassen, « Elaboration de non tissés à base de fibres d'alfa ». Disponible sur : non-woven.blogspot.fr.
- [55] P. Font Quercus, « Diccionario de Botánica ». 6e éd. Ed. Labor, Barcelone, Espagne. **1977**.
- [56] W. Robbins, T. Weier, C. Stocking, « Botany, an introduction to plant science ». New York: John Wiley, **1958**.
- [57] R. Piazzetta et J. Arnaudès, « La levée du liège, ce qu'il faut savoir sur l'exploitation du chêne liège, guide technique et de vulgarisation (IML) ». **2005**.
- [58] B. Imen, « Causes et conséquences des feux de forêts sur la production du liège dans les subéraies du nord-est algérien-Essai de valorisation et réhabilitations ». Memoir de Magister en Ecologie Environnement, Université Constantine 1, **2014**.
- [59] C. Fialho, F. Lopes and H. Pereira, « The effect of cork removal on the radial growth and phenology of young cork oak trees ». *Forest Ecology and Management*, **2001**.

- [60] M. I. d. F, « Carrasquinho: Boletim do Instituto dos Produtos Florestais – Cortiça ». **1987**.
- [61] A. Costa, H. Pereira and Â. Oliveira, « Influence of climate on the seasonality of radial growth of cork oak during a cork production cycle ». *Annals of Forest Science*, **Vol.59**, **2002**.
- [62] B. Groh, C. Hubner and K. J. Lenzian, « Water and oxygen permeance of phellem isolated from trees: the role of waxes and lenticels ». *Planta* 215, 794-801, **2002**.
- [63] Y. Lei, T. Jia, X. Song, « *Chemical composition of cork from quercusvariabilis* ». *Wood and Fiber Science*, 44(2), **2012**.
- [64] M. M. Caldas, J. L. Ferreira and M. Borges, « Boletim do Instituto dos Produtos Florestais – Cortiça ». **1986**.
- [65] « Guide technique pour la gestion des forêts de chêne liège en corse-du-Sud ». Division forestière de l'Office du Développement Agricole et Rural de Corse, Edition **2008**.
- [66] J.R. Lawton, « Observations on the structure of epidermal cells, particularly the cork and silica cells, from the flowering stem internode of *Lolium Temulentum* L. (Gramineae) ». *Journal of the Linnean Society*, **1980**.
- [67] V. B. Sousa, S. Leal, T. Quilho and H. Pereira, « Characterization of cork oak (*quercussuber*) wood anatomy ». *IAWA Journal*, **Vol.30** (2), **2009**.
- [68] M. L. Molinas and D. Verdaguer, « lignotuber ontogeny in the cork-oak (*quercussuber*; *fagaceae*) I. late embryo ». *American Journal of Botany* 80(2):172-181, February **1993**.
- [69] M. L. Molinas and D. Verdaguer, « Lignotuber ontogeny in the cork-oak (*quercussuber*; *fagaceae*) II. Germination and young seedling ». *American Journal of Botany*, **1993**.
- [70] <https://corkup.fr/le-liege-fabrication-caracteristiques/>
- [71] M, RAGOUBI, « Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles /matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne ». Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, **2008**.
- [72] L. Augier, « Etude de l'élaboration de matériaux composites PVC/bois à partir de déchets de menuiserie : formulation, caractérisation, durabilité et recyclabilité ». Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, **2007**.

- [73] L. YAHIAOUI, « Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss) ». Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif ,**2011**.
- [74] M. Nardin, « Interfaces fibre-matrice dans les matériaux composites. Application aux fibres végétales ». Journal of Revue de Composites et des Matériaux Avances, Lavoisier, 16, 49-62, **2006**.
- [75] A. Bledzki, J. Gassan, « Composite sreinfoced with cellulose based fibres ». Progress in Polymer Science, **Vol.24**, p221-274, **1999**.
- [76] S. Bouhank, « Élaboration de matériaux composites pvc /fibres de Genet d'Espagne : formulation et caractérisations ». Thèse de Doctorat, Université Ferhat ABBAS-Sétif 1, Sétif, **2017**.
- [77] I. Salama, « Caractéristiques physico-mécaniques des composites bois plastiques provenant de la valorisation des résidus des panneaux mdf- étude des possibilités de recyclage ». Thèse de la maitrise en ingénierie, Québec : Université du Québec, **2008**.
- [78] M. Ramakrishna, K. Vivek, N. Yuvraj Singh « Recent development in natural fibre reinforced polpropylene composites ». Journal of Reinforced Plastics and composites, **Vol.28**, **2008**.
- [79] M. Alilahmar, « Caractérisation d'un composite bois polymère pour utilisation en plaques de bardage par extérieur ». Thèse s'inscrit dans le cadre du projet ECOCIS, Université de Lyon, **2016**.
- [80] H. Boulahia, « Étude du comportement physico-mécanique de nouveaux bio composites poudre de liège – PVC ». Thèse de Doctorat LMD, Université Mohamed Bougara Boumerdes. Boumerdes, **2016**.
- [81] W. Li, X. Liu, J. Wu, L. Wu, A. Sun, L. Wei, « Two-component modified polyurethane sealant for insulating glass: Design, preparation, and application ». Journal of Applied Polymer Science, **2019**.
- [82] S. Paul, P. Nanda, R. Gupta, « PhCOCl-Py/Basic Alumina as a Versatile Reagent for Benzoylation in Solvent-Free Conditions ». Molecules Diversity Preservation International, **2003**.

[83] K. Joseph, L. H. C. Mattoso, R. D. Toledo, « Natural Fiber reinforced thermoplastic composites ». Natural polymers and Agro fibers Composites, **2000**.

[84] M. Farsi, « Thermoplastic Matrix Reinforced with Natural Fibers: A Study on Interfacial Behavior ». Journal Intechopen, **2019**.

[85] A.R. Samadi, D. F. Caulfield, R.E. Jacobson, R. M. Rowable, « Agricultural fibers as reinforcing fillers in plastics: mechanical properties of kenaf fibers polypropylene composites ». American Chemical Society, **Vol.34, 1995**.

[86] M. M. Kabir, H. Wang, K.T.Lau, F.Cardona, « Chemical treatment-1896, on plant based natural fibers and their reinforced composites based on different polymeric matrices ». Journal of material, **2013**.

[87] D. Ray, B. K. Rana, N.R. Bose, « Effect of alkali treated jute fibers on composite properties ». Bulletin of material science 24, **2001**.

[88] M. Adelmouleh, S. Boufi, M.N. Belgacem, A. Dufresne, « Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural composite: Effet of silanecouplage agents and fibers loading ». Composites science and technology67, **2007**.

[89] P. Thori, P. Sharma, M. Bhargava, « An approach of composite materials in industrial Machinery: advantages, disadvantage and application ». International Journal of Research in Engineering and Technology, **Vol.02, 2013**.

[90] M .Mrazova, « Advanced composite materials of the future in aerospace industry ». Incas Bulletin, **Vol.05, 2013**.

CHAPITRE II

Synthèses bibliographiques

Chapitre II

Synthèses bibliographiques

Dans ce chapitre nous intéressons aux travaux menés par certains auteurs sur les matériaux composites.

Emanuel M. Fernandes et al [1]. On fait une étude comparative entre un nouveau composite à deux matrices polypropylène et polyéthylène chargées à 50% de poudre de liège, ils ont étudié les différentes caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques ; ils ont constaté que les composites chargés de poudre de liège possèdent de meilleures caractéristiques (une bonne stabilité thermique, une meilleure isolation acoustique, une grande légèreté, etc...).

Emanuel M. Fernandes et al [2]. Ont aussi procédé à la valorisation de la poudre de liège issue de plusieurs origines, dans l'élaboration des composites à matrices thermoplastiques, et, pour l'adhésion interfaciale, ils ont ajouté (2%) de l'anhydride maléique comme agent de couplage, le procédé par injection a été utilisé pour la mise en œuvre des composites ; ils ont constaté une amélioration de la résistance à la traction et l'augmentation de la rigidité favorisée avec la présence de la poudre de liège.

A. Diaz-Parralejo et al [3]. A fait varier trois paramètres l'épaisseur, le pourcentage de la poudre et la taille des grains de liège ; ils ont étudié leurs effets sur la résistance à la flexion ; l'augmentation de ces paramètres conduit à l'accroissement de la résistance à la flexion.

Carla Vilela et al [4]. 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.

Jacek et al [5]. Ont faits des études comparatives de l'utilisation d'un système de remplissage hybride sur les propriétés du polypropylène et des composites poly (acide lactique) PE-liège/bois et PLA- liège/bois. La farine de bois a été ajoutée pour améliorer les performances initialement médiocres des matériaux composites à base de liège. Le système hybride liège/charge de bois utilisé au cours de cette étude a été introduit dans le système polymère par un procédé de moulage par extrusion/injection en deux étapes et de 10, 20 et 30 % en poids. Les échantillons ont été soumis à une analyse thermomécanique et structurale détaillée. La méthode d'hybridation étudiée a été mise en œuvre avec succès, ce qui a permis

d'améliorer les caractéristiques mécaniques par rapport aux composites de PE-liège. L'analyse de la densité, combinée aux observations structurales, a confirmé des changements significatifs dans la morphologie du liège, y compris la perte de la structure cellulaire, due au cisaillement élevé du processus de moulage par injection. Les résultats favorables des tests d'absorption d'eau indiquent l'utilisation potentielle du liège pour améliorer la stabilité dimensionnelle des composites.

Pal et al [6]. 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, montrée 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 du 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.1**, 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.

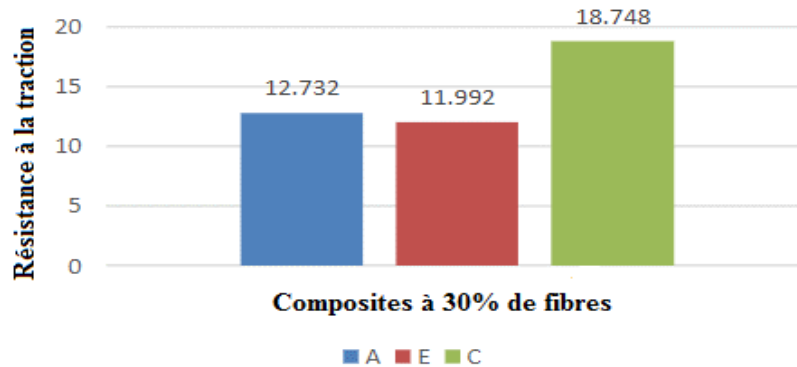


Figure II.1 : Comparaison de la résistance à la traction de composites hybrides avec des composites à fibre unique (sisal / chanvre) à 30% de charge de fibre.

Perez-Fonseca et al [7]. 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 suivies d'un moulage par injection. L'effet du mélange de deux fibres naturelles différentes et de l'ajout d'un agent de couplage polyéthylène maléaté (PE-g-MA) sur l'absorption d'eau, les propriétés mécaniques et la morphologie ont été rapporté. 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 de 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 le 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 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 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 PE-g-MA et jusqu'à 10 % (de 45 à 49 J/m) avec 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 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 (PE-g-MA), 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 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.

Radzi et al [8]. Ont étudié l'effet de la charge de la fibre de palmier à sucre (SPF) par rapport aux propriétés mécaniques des composites hybrides roselle (RF)/SPF/polyuréthane thermoplastique (TPU). Les composites hybrides RF/SPF/TPU ont été fabriqués à différents rapports de poids (100:0, 75:25, 50:50, 25:75 et 0 :100) par mélange à l'état fondu et compression à chaud. Les propriétés mécaniques (essai de traction, de flexion et d'impact) et morphologiques des échantillons fracturés en traction ont été examinées à l'aide d'une machine d'essai universelle, d'une machine à impact et d'un microscope électronique à balayage. La résistance à la traction du composite hybride RF/SPF/TPU est illustrée à la **figure II.2**. La résistance à la traction et le module des composites hybrides RF/SPF/TPU diminuent avec l'augmentation de la teneur en SPF. Le RS-1 (75% RF, 25% SPF) a montré la valeur la plus élevée en matière de résistance à la traction par rapport aux autres composites hybrides. La valeur la plus élevée de résistance à la traction enregistrée était de 13,4 MPa. De plus, l'ajout de SPF a été l'un des facteurs qui ont affaibli la liaison interfaciale des composites hybrides. Le SPF-T (60% TPU, 40% SPF) a montré la plus faible résistance à la traction par rapport au RF-T (60% TPU, 40% RF) et aux autres composites hybrides. En outre, la résistance à la traction dépend de l'effet de l'adhésion entre la matrice et la fibre. Par conséquent, l'inclusion de SPF dans le composite conduit à la formation de vides, qui peuvent être clairement vus dans la morphologie du SPF de chaque composite. Une étude morphologique (MEB) sur la rupture en traction a montré une faible adhérence de l'interface hybride-matrice et des arrachements de fibres de la matrice. Les résultats de la résistance à la flexion et le module des composites hybrides RF/SPF/TPU **figure II.3** montrent une tendance similaire pour la résistance à la traction, dans laquelle la résistance et le module diminuent avec l'augmentation de l'incorporation de SPF. Les composites hybrides RS-1 ont montré la résistance la plus élevée ; la valeur de la résistance était de 10,19 MPa et celle du module de 168,23 MPa. Cette amélioration de la résistance à la flexion peut être attribuée aux mêmes raisons que l'augmentation de la résistance à la traction. La résistance et le module des composites SPF/TPU à fibre unique ont davantage diminué que ceux des composites RF/TPU. Cela est peut-être dû à la faible résistance à la flexion des composites SPF/TPU qui n'ont pas contribué à améliorer leurs propriétés mécaniques lorsque le SPF a été incorporé dans le système hybride.

La diminution de la résistance à la flexion peut être due à l'agglomération des fibres, ce qui entraîne des faiblesses dans l'interface entre les fibres et la matrice. Les résultats de la résistance à l'impact du composite hybride RF/SPF/TPU **figure II.4** montrent que, contrairement à la résistance à la traction et à la flexion, l'augmentation de la teneur en SPF de l'hybride a augmenté sa résistance à l'impact. L'augmentation de la résistance à l'impact peut être due au fait que les composites hybrides RF/SPF peuvent absorber efficacement l'énergie d'impact et présentent de petites déformations localisées des fibres. En outre, les composites SPF/TPU à fibre unique ont montré la valeur la plus élevée par rapport aux composites RF/TPU. Il est possible que la propriété d'impact ait été améliorée lorsque le SPF a été incorporé dans le système hybride. Le RS-3 (75% SPF, 25% RF) présente la valeur la plus élevée, soit 32,4 kJ/m², suivi de 18,4 kJ/m² (RF-T), 30 kJ/m² (RS-1), 30,22 kJ/m² (RS-2 (50% SPF, 50% RF) et 27,4 kJ/m² (SPF-T).

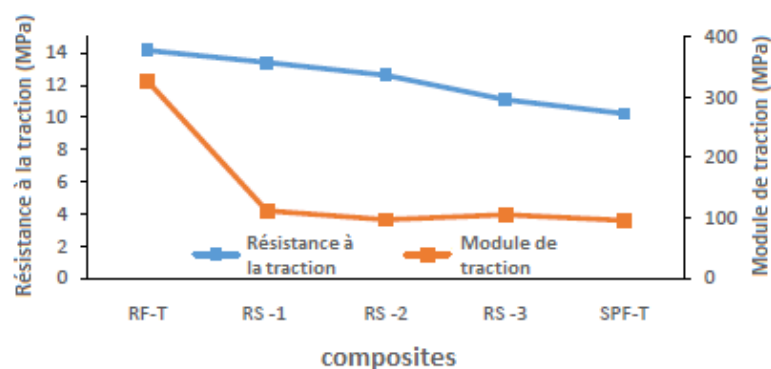


Figure II.2 : Résistance à la traction et module des composites hybrides RF/SPF/TPU.

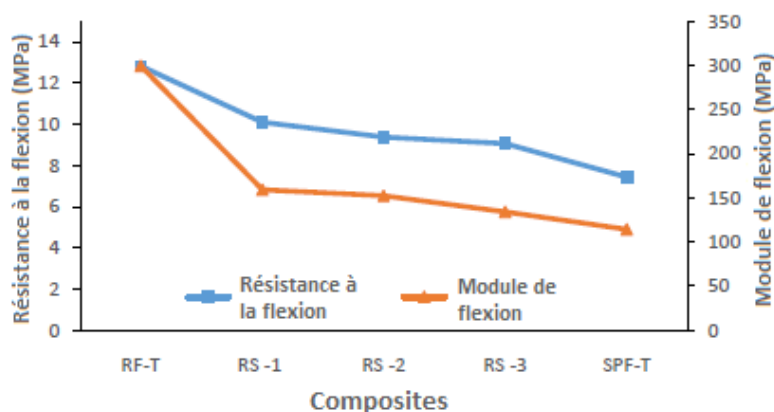


Figure II.3 : Résistance à la flexion et module des composites hybrides RF/SPF/TPU.

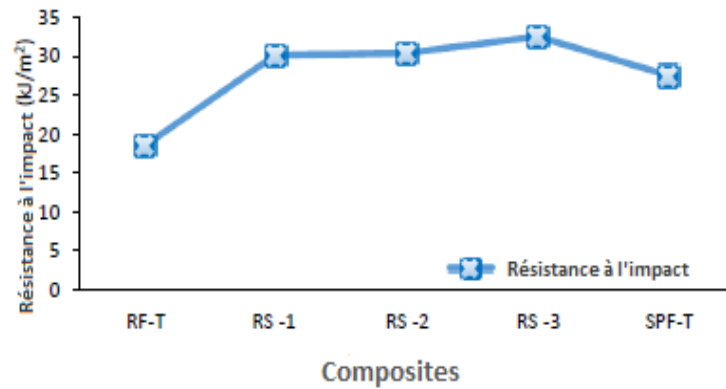


Figure II.4 : Résistance à l'impact des composites hybrides RF/SPF/TPU.

Enfin il a été constaté que l'hybridation des RF/SPF augmentait leur résistance à l'impact correspondant à l'augmentation de la teneur en SPF des composites. Lorsque le SPF a été ajouté dans les composites RF, les propriétés de traction et de flexion des composites hybrides ont diminué en raison d'une mauvaise liaison interfaciale entre la fibre et la matrice. Des micrographies électroniques à balayage de la surface de rupture en traction des composites hybrides RF/SPF ont révélé des arrachements de fibres et une mauvaise liaison d'adhérence. En conclusion, l'hybridation du SPF avec les composites RF/TPU a amélioré sa résistance à l'impact tout en diminuant la résistance à la traction et à la flexion.

Surendra et al [9]. Ont étudié les propriétés mécaniques du composite polymère renforcé de fibres sisal et du composite hybride polymère renforcé de fibres naturelles (jute, sisal et d'okra). Les fibres ont été préparées à partir de 35 % de sisal, 35 % de jute et 30 % d'okra, qui est conservés dans des proportions de poids variables de 0,4 à 2 grammes. Le composite a été moulé et l'échantillon d'essai a été retiré. Les résultats ont montré que la résistance à la traction du composite hybrides renforcé par des fibres (sisal + jute + okra) est supérieure de 9,8 % à celle du composite polymère renforcé par des fibres de sisal, et que le module de traction du composite hybride est supérieur de 8,7 % à celui du composite polymère renforcé par des fibres de sisal. La résistance maximale à la flexion du composite hybride est supérieure de 4,7 % à celle du composite polymère renforcé de fibres de sisal. L'énergie d'impact maximale du composite hybride est 33,6 % plus élevée que celle du composite polymère renforcé de fibres de sisal.

Rosni Binti et al [10]. Ont étudié les propriétés de traction et de flexion des composites hybrides en utilisant des fibres de kénaf, de bambou et de coco pour renforcer la matrice polymère d'acide polylactique (PLA). Les résultats obtenus ont montré que les composites

Kénaf bambou-coco /PLA atteignaient une résistance à la traction de 187 MPa, ce qui est supérieur de 20 % et 78 % à ceux du bambou-coco/PLA et du kénaf-coco/PLA, respectivement. Les fibres de bambou et de kénaf présentent des modules d'Young plus élevés et contribuent à des charges de résistance plus élevées, tandis que les fibres de coco présentent des propriétés ductiles. Lorsque la teneur en fibres de coco était élevée (plus de 25 %) dans d'autres composites, une faible teneur en coco se traduisait par une faible ténacité qui présentait un module d'élasticité élevé, utilisés pour des applications structurelles [11]. Une résistance élevée à la flexion a été démontrée par les composites kénaf-bambou-coco/PLA (199 MPa) et bambou-coco/PLA (206 MPa) qui sont 16 % et 20 % plus élevés que ceux du kénaf-coco/PLA. Mais ce sont les composites kénaf-coco/PLA qui ont le module de flexion le plus élevé, soit 70 % de plus que les autres composites.

Daniella et al [12]. La présente étude examine les comportements de traction et de flexion des composites fibres de palmier-polyéthylène haute densité (HDPE) en fonction de la fraction volumique. La surface des fibres a été traitée par des traitements de mercerisation pour améliorer le comportement mouillant du HDPE apolaire. La caractérisation du traitement a été obtenue par microscopie électronique à balayage, diffraction des rayons X et spectroscopie infrarouge. Les résultats montrent qu'une bonne adhérence interfaciale entre les fibres et la matrice a entraîné une augmentation de la résistance et du module de flexion ainsi que de la résistance à la traction dans les composites fibres/HDPE modifiés par rapport au PEHD pur et aux composites renforcés de fibres non traitées.

Carla R et al [13]. Dans cette enquête, des matériaux composites fabriqués à partir de polyéthylène haute densité (HDPE) et d'alumine, ainsi que de HDPE, d'alumine et de fibres de verre, ont été préparés, visant à améliorer la stabilité thermique, la rigidité et la résistance mécanique. Les effets combinés de l'alumine et des fibres de verre et les effets individuels de l'alumine ont été étudiés. Les concentrations d'alumine variaient de 5 % en poids à 10 % en poids et les concentrations de fibres de verre variaient de 10 % en poids à 30 % en poids. Pour les matériaux composites hybrides, la concentration en alumine a été maintenue constante à mesure que la concentration en fibres de verre augmentait. Les composites ont été préparés avec une extrudeuse à double vis. Les résultats ont mis en évidence une augmentation significative du module d'élasticité du composite hybride (jusqu'à 501% par rapport au polymère pur), au prix d'une forte diminution de la ténacité, parallèlement à une baisse de la résistance aux chocs. L'amélioration du module élastique a été observée dans les composites hybrides et HDPE-alumine, étant plus élevée pour les composites hybrides en raison de l'ajout de fibres de

verre. Les composites HDPE-alumine ont présenté une diminution de la résistance mécanique, alors que les composites hybrides ont montré une augmentation de ce paramètre. Concernant les propriétés thermiques, les composites hybrides ont présenté une stabilité thermique supérieure à celle des composites HDPE-alumine et une température de dégradation similaire à celle du polymère pur. Les micrographies ont mis en évidence une faible adhérence entre les particules d'alumine et la matrice polymère ainsi qu'un léger degré de détachement des fibres. Dans l'ensemble, les composites hybrides présentaient une rigidité et une résistance mécanique considérablement plus élevées que le polymère pur et le composite HDPE-alumine (augmentation de 19 à 26 %), sans changement significatif de la stabilité thermique.

Arrakhiz FZ et al [14]. Dans ce travail, du polyéthylène haute densité (PEHD) a été mélangé avec de la fibre de coco à l'aide d'un broyeur à deux cylindres. Trois traitements chimiques notés silane, soude (NaOH) et bromure de dodécane (C12) ont été sélectionnés pour améliorer l'adhérence de l'interface entre les fibres et la matrice polyéthylène. Les propriétés mécaniques de ces composites ont été évaluées et comparées à celles de polymères purs et de composites de fibres non traitées. Une charge fixe de fibres de 20 % en poids a été utilisée dans tous les composites. Une analyse chimique utilisant la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a été réalisée pour voir l'étendue de la modification chimique des fibres. Les résultats ont montré que les modules de traction et de torsion présentaient une augmentation significative par rapport au PEHD pur. Une augmentation notable du module d'Young a été observée lorsque C12 et le silane ont été utilisés, correspondant à 120 % et 70 %, respectivement. La ductilité des composites a également été évaluée par l'énergie stockée par le plastique et a montré une augmentation notable lorsque le C12 et le silane étaient utilisés, une augmentation de 55 % avec le traitement au C12 et de 23 % lorsque le traitement au silane était utilisé. De tels résultats promettent de nombreuses applications pour les matériaux composites.

Arrakhiz FZ et al [15]. Ont étudié les propriétés mécaniques des composites de polypropylène (PP) renforcés de fibres d'alfa, de coco et de bagasse ont été étudiées. Afin d'améliorer les propriétés mécaniques du composite, les fibres ont été traitées avec NaOH pour éliminer les cires naturelles et autres composés non cellulosiques. Les propriétés mécaniques des composites obtenus avec ces trois fibres se sont avérées supérieures à celles du polymère pur. L'ajout de différentes quantités de fibres de renforcement a entraîné des augmentations notables du module de traction et de flexion ainsi que du paramètre de torsion. Augmentation

de 56 à 75 % du module de traction ont été observés par l'utilisation d'alfa, de coco et de bagasse tandis que le module de flexion a augmenté de 30 à 47 % par rapport au PP pur. Une augmentation du module de torsion est également observée lorsque la teneur en fibres dépasse un niveau seuil.

Arrakhiz FZ et al [16]. Dans ce travail traite des propriétés mécaniques et thermiques du composite hybride de polypropylène renforcé de fibres d'argile et de pomme de pin à un pourcentage en poids total de 30. Pour améliorer la mouillabilité des charges dans le polymère, un agent de couplage a été ajouté et un traitement de mercerisation a été effectué sur les fibres. Des essais de traction, de torsion, de dureté ont été menés sur ces composites pour évaluer l'impact des charges hybrides. Les résultats des propriétés de traction indiquent que le module d'Young a augmenté pour l'ensemble des systèmes atteignant un gain de 80 %, tandis que la résistance à la traction est restée stable avec l'utilisation des deux charges.

Pour les caractérisations de torsion et de dureté d'un tel composite hybride, une augmentation de la résistance à la torsion est notée avec l'ajout d'argile lorsque les propriétés de dureté diminuent à forte charge d'argile. La dégradation thermique diminue avec l'ajout de fibres ce qui est normal avec l'ajout d'une charge à basse température de dégradation.

Arrakhiz et al [17]. Les propriétés mécaniques des composites de polypropylène (PP) renforcés de fibres d'alfa, de fibre de coco et de bagasse ont été étudiées. Afin d'améliorer les propriétés mécaniques du composite, les fibres ont été traitées aux alcalis avant d'être mélangées pour éliminer les cires naturelles et autres composés non cellulosiques. Les propriétés mécaniques des composites obtenus avec ces trois fibres se sont avérées supérieures à celles du polymère pur. L'addition de diverses quantités de fibres de renforcement a entraîné une augmentation notable du module de traction et de flexion ainsi que du paramètre de torsion. Une augmentation de 56 à 75% du module de traction a été observée grâce à l'utilisation d'alfa, de fibre de coco et de bagasse, tandis que le module de flexion a augmenté de 30 à 47% par rapport au PP pur. Une augmentation du module de torsion est également observée lorsque la teneur en fibres dépasse un seuil.

Perez Fonseca et al [18]. Ce travail rend compte des propriétés des composites hybrides à base de polyéthylène haute densité fabriqués à partir de deux fibres naturelles : l'agave et le pin. Les composites ont été produits par une combinaison d'extrusion et de moulage par injection. L'effet de l'hybridation a été analysé par des tests morphologiques, mécaniques et

d'immersion dans l'eau pour deux teneurs totales en fibres, 20 et 30 % en poids, et différents rapports de fibres pin-agave (100-0, 80-20, 60-40, 40-60 et 0-100). En outre, l'effet de l'agent de couplage polyéthylène maléaté (PE-g-MA) dans la formulation du composite hybride a été évalué. Les résultats de la résistance à la traction sont présentés à la **figure II.5**, et montrent qu'une augmentation de 25% a été obtenue en ajoutant les fibres d'agave et un agent de couplage dans les composites PEHD-pin. Sans agent de couplage, la résistance à la traction des composites hybrides était très similaire pour toutes les combinaisons avec une moyenne de $24,6 \pm 0,5$ MPa et $24,0 \pm 0,2$ MPa pour les composites ayant une teneur totale de 20 % et 30 % de fibre. Mais avec l'ajout de PE-g-MA, les valeurs ont augmenté avec l'augmentation du rapport de fibre d'agave dans les composites hybrides. Par exemple, à 30% de fibre total avec 3% PE-g-MA, la résistance à la traction était de 27,5 MPa alors qu'elle n'était que de 23,9 MPa pour le PEHD/Pin. Les résultats de la résistance à la traction obtenus après absorption d'eau ont montré que l'absorption d'eau affecte davantage cette propriété que la résistance de flexion. Les résultats de la résistance à l'impact sont présentés sur la **figure II.6**. L'ajout des fibres d'agave a permis d'améliorer la résistance à l'impact des composites PEHD-pin, qui a augmenté de 27 et 40 % pour les composites hybrides à 20 et 30 % du contenu total de fibre, respectivement. L'utilisation du PE-g-MA dans les composites hybrides a montré des améliorations des propriétés des composites lorsque les fibres d'agave a été utilisé dans la formulation. La résistance à l'impact a augmenté lorsque la teneur en agave a été augmentée dans les composites avec ou sans PE-g-MA. Pour les composites PEHD-agave avec 20 % du contenu total de fibre, la résistance à l'impact était de 51 J/m, tandis que pour les composites PEHD-pin, la valeur est inférieure de près de 30 % (37 J/m). En ce sens, la force d'impact du PEHD pur était de 45 J/m. Les résultats de la résistance à l'impact ont montré qu'avec une combinaison des deux fibres (hybridation), la résistance à l'impact était plus élevée que pour les composites fabriqués avec le pin seul. Ici, l'utilisation de 30 % du contenu total de fibre avec un rapport 40/60 et 20/80 (pin/agave) a augmenté la résistance à l'impact de 41 % et 35 % respectivement, par rapport à la résistance à l'impact des composites PEHD-pin. Les composites fabriqués à partir des fibres d'agave et du pin présentaient une meilleure résistance de flexion lorsque la quantité d'agave dans les composites hybrides était plus élevée **figure II.7**. L'effet de l'absorption d'eau sur la force de flexion a été évalué et il a été constaté que l'hybridation avait un effet positif. Il a été observé que pour les composites ayant une teneur totale de 30 % et 3 % de PE-g-MA à des rapports de fibre 60/40 et 40/60 pin/agave, la résistance de flexion est restée pratiquement inchangée après immersion dans l'eau : 27,2-27,0 MPa et 28,5-28,2 MPa, respectivement.

Comme prévu, l'ajout de l'agent de couplage a diminué la perte de résistance de flexion causée par l'absorption d'eau. Les résultats du module de flexion montrent que les composites hybrides ayant une teneur plus élevée en agave étaient plus élevés que ceux des composites PEHD-pin.

L'utilisation d'un agent de couplage dans les composites ayant une teneur totale en fibre de 30 % et un rapport 20/80 (pin/agave) a fait passer le module de flexion de 1063 à 1173 MPa. Pour un contenu total de 20 %, des résultats similaires ont été obtenus avec et sans PE-g-MA.

Les résultats obtenus dans cette étude ont clairement montré que l'effet de PE-g-MA était plus important dans les composites avec les fibres d'agave, ce qui a conduit à une augmentation de l'impact, flexion et de la résistance à la traction des composites hybrides. La résistance à l'impact, flexion et à la traction ont été augmentés de 41%, 22% et 13% respectivement, dans les composites avec 30% de la fibre total pin/agave et un rapport de 20/80 par rapport aux composites fabriqués avec les fibres de pin seul.

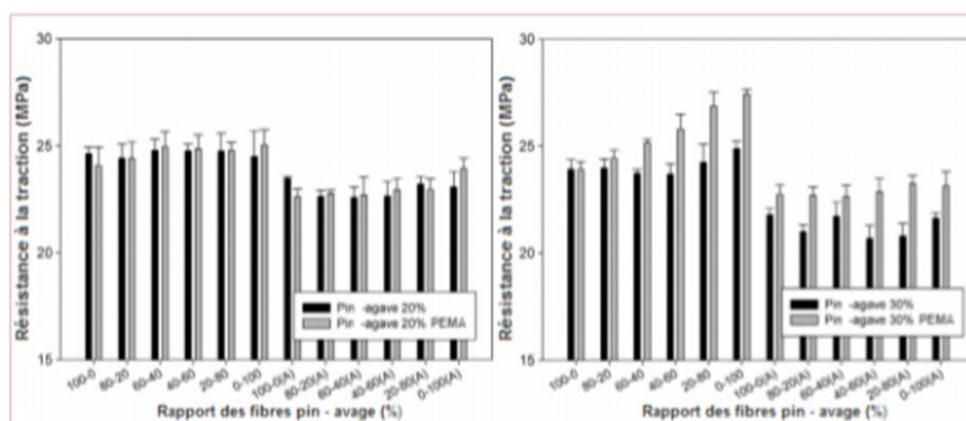


Figure II.5 : Résistance à la traction avant et après l'absorption d'eau des composites hybrides avec : 20% et 30% de teneur totale en fibres.

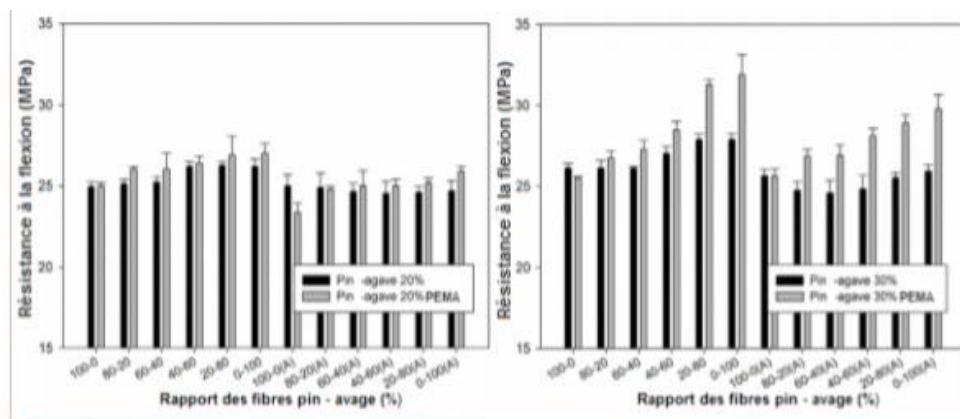


Figure II.6 : Résistance à la flexion avant et après l'absorption d'eau des composites hybrides avec : 20% et 30% de teneur totale en fibres.

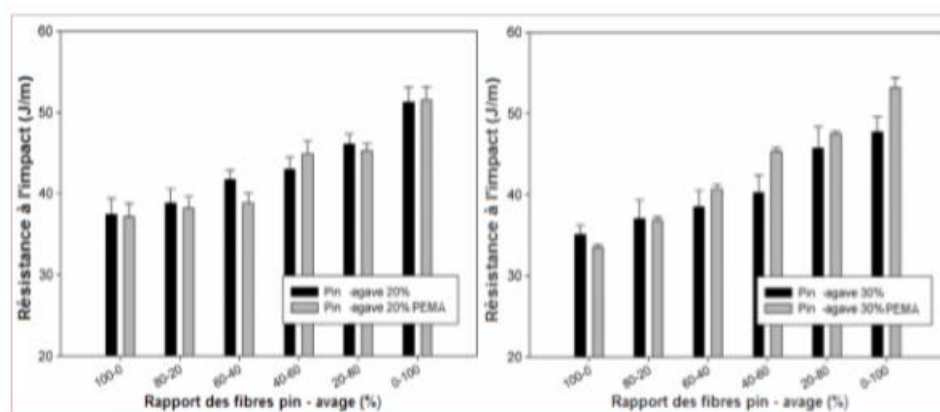


Figure II.7 : Résistance à l'impact des composites hybrides avec : 20 % et 30 % de teneur totale en fibres.

Les résultats de l'absorption d'eau ont montré les faibles niveaux d'absorption d'eau des fibres de pin, ce qui a contribué à réduire l'absorption d'eau des composites hybrides. En même temps, toutes les propriétés mécaniques n'étaient pas modifiées. Une réduction de 35% de l'absorption d'eau pour les composites avec 30% du total de fibre à 40/60 (pin/agave) a été obtenue par rapport aux composites réalisés avec les fibres d'agave seul. Il a été constaté que l'ajout des fibres d'agave et du PE-g-MA améliorait les propriétés mécaniques, tandis que l'ajout des fibres de pin réduisait l'absorption d'eau et maintenait les propriétés constantes dans le temps. Enfin ils ont conclu qu'une combinaison appropriée de deux fibres naturelles différentes permettait d'obtenir des matériaux composites aux caractéristiques uniques.

Herrera-Franco et Valdèz-González [19]. Ont mené une étude de l'effet de la nature de l'agent de modification sur les propriétés mécaniques des composites polyéthylènes haute densité (PEHD)/ fibres d'henequen. Les fibres ont été modifiées par une solution alcaline de 2% de NaOH pendant 1heure à une température de 25°C, et par l'utilisation d'un agent de couplage vinyltris (2 méthoxy-ethoxy) silane (Silane A-172) à une concentration de 1%.

Les composites PEHD/fibres ont été préparés à un taux de 20% de fibres. Les résultats ont montré que les propriétés mécaniques sont en fonction de type de modification et de l'orientation des fibres. Ils ont observé une augmentation de 20 et 30% pour la résistance et l'allongement à la rupture respectivement.

Rokbi et al [20]. Ont étudié le traitement alcalin des fibres Alfa pour améliorer la qualité de l'interface fibres-matrice. Par conséquent l'adhésion des fibres Alfa traitées avec la matrice polymère est importante. Le renforcement par des fibres traitées avec 10% de NaOH durant 24h conduit à l'amélioration de la contrainte et du module de flexion d'environ 60% et de 62%, respectivement. Le traitement des fibres pour des durées prolongées les rend plus rigides. Les résultats de ce travail suggèrent que les fibres locales Alfa sont comparables à d'autres fibres naturelles utilisées comme renfort dans des matrices polymériques. Elles sont complètement aptes à l'utilisation comme renfort dans les matériaux composites.

Herrera-Franco et al [21]. Ont étudié des composites à base de polyéthylène haute densité (PEHD) renforcés par des fibres de chanvre. Pour ce faire, la modification de surface des fibres a été étudiée en utilisant le traitement alcalin et une préimprégnation de matrice en utilisant un organo fonctionnel silane comme agent de couplage. Selon eux, l'interaction interfacial PEHD-chanvre a été améliorée en employant des concentrations en silane les plus élevées. Par contre, ils ont également constaté que les propriétés mécaniques des composites et spécifiquement la résistance à la traction et au fluage ne se sont pas améliorées de manière significative pour les concentrations élevées en silane. Cependant, l'augmentation de propriété mécanique s'est étendue entre 3 et 43% pour la résistance à la traction et au fluage longitudinal et une augmentation de 339% en valeur de rigidité par rapport à la rigidité de la matrice de PEHD. La contribution des fibres de chanvre à la rigidité des composites dans la direction longitudinale était inférieure à celle calculée par la loi des mélanges. Alors que, la modification de surface des fibres a un effet notoire sur les propriétés des composites dans la direction perpendiculaire aux fibres où les améliorations étaient au-dessus de 50% par rapport aux composites non traités.

Nikhil et al [22]. Ont étudié les composites hybrides de polyéthylène renforcé avec du sisal et de coco. Ici, les PEHD ont été utilisés vierge (V) et recyclés (R), les fibres de sisal et de coco sont lavées et traitées avec une solution chimique de NaOH pour étudier la modification chimique des surfaces des fibres. Les résultats montre que les composites hybrides PEHD / sisal-coco présentent de grandes propriétés de traction et de flexion par rapport à l'utilisation d'une seule fibre. Lorsque la teneur en fibres de sisal et de coco dans le composite est de 10 % en poids et que le PEHD est de 80 %, la résistance à la traction est de 21,6 MPa et la résistance à la flexion de 18,5 MPa, alors que la teneur en sisal et en coco de 5 % et en PEHD de 90 %, qui donne une résistance à la traction, est de 19,5 MPa et une résistance à la flexion de 17,5 MPa. Mais avec 30 % de sisal et 70 % de PEHD, la résistance à la traction est de 12,4 MPa et la résistance à la flexion de 14,3 MPa. De même, avec seulement 30 % de fibre de coco et 70 % de PEHD, la résistance à la traction est de 12,0 MPa et la résistance à la flexion de 14,6 MPa **tableau II.1**. Ils sont conclu que les fibres de sisal et de coco sont les principaux renforts qui confèrent au composite de grandes propriétés de traction et de flexion, comme dans les comparaisons avec d'autres matériaux. Ils sont conclu que le PEHD recyclé et le PEHD vierge pourraient être utilisés pour fabriquer des composites hybrides renforcés de fibres ayant des propriétés de traction et de flexion plus élevées. La comparaison des résistances à la traction et à la flexion de divers échantillons, telles que codées dans le **tableau II.1**, est présentée à la **figure II.8, II.9**.

Tableau II.1 : Résistance à la flexion et à la traction de différents composites.

Les échantillons (%)	Compositions			Résistance à la traction(MPa)	Résistance à la flexion(MPa)
	PEHD(%)	Sisal(%)	Coco(%)		
E1 :100V+0R	100	0	0	15,21	16,8
E2 :45V+45R	90	5	5	19,5	17,5
E3 :40V+40R	80	10	10	21,6	18,5
E4 :35V+35R	70	0	30	12,4	14,3
E5 :35V+35R	70	30	0	12,0	14,6

A partir du **tableau II.1**, la résistance à la traction d'un composite hybride avec 10 % en poids de fibres de sisal et 10 % en poids de fibres de coco (E3) donne une résistance à la traction et à la flexion supérieur à (E2) avec une teneur en fibres de sisal de 5 % en poids et de coco de 5 % en poids dans le composite. Il est à noter que si l'on augmente encore la quantité de fibres de sisal et de coco dans le composite hybride, la résistance à la traction et à la flexion est encore

plus élevée. L'hybride (E3) possède une résistance à la traction et à la flexion maximale de 21,6 MPa et 18,5 MPa, respectivement.

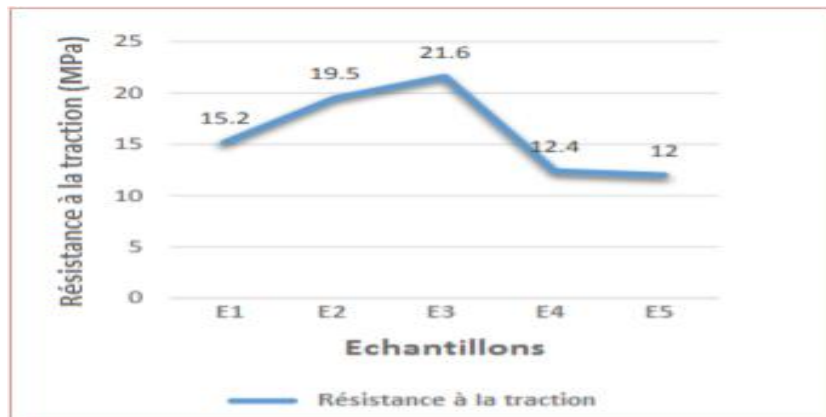


Figure II.8 : Résultat de la résistance à la traction pour différentes fractions volumiques.

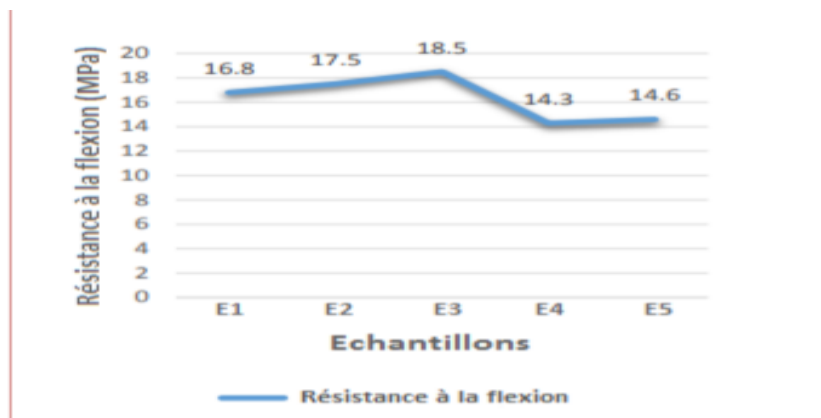


Figure II.9 : Résultat de la résistance à la flexion pour différentes fractions volumiques.

Ils sont conclus que le PEHD recyclé et le PEHD vierge pourraient être utilisés pour fabriquer des composites hybrides renforcés de fibres ayant des propriétés de traction et de flexion plus élevées.

Références bibliographiques

- [1] M.F. Emanuel, C.M. Vitor, C.A.M. José, M.F. João, L. Rui, « Properties of new cork–polymer composites: Advantages and drawbacks as compared with commercially available fibre board materials Reisa ». *Composite Structures*, **2011**.
- [2] M.F. Emanuel, C.M. Vitor, M.F. João, L. Rui, « Polypropylene-based cork–polymer composites: Processing parameters and properties ». *Composites Part B: Engineering*, **2014**.
- [3] P.A. Diaz, D.M.A. Diaz, A. Macias-Garcia, B.P. de la Rosa, « Gomez Serrano V, Bending strength of black and composite agglomerates of cork ». *Materials Letters* 57, **2003**.
- [4] V. Carla, S.F. Andreia, F.S.R. Carmen, S.J.D. Armando, P.N. Carlos, « Novel sustainable composites prepared from cork residues and biopolymers ». *Biomass and Bioenergy* 55, 148-155, **2013**.
- [5] J. Andrzejewski, M. Szostak, M. Barczewski, P. Łuczak, « Cork-wood hybrid filler system for polypropylene and poly (lactic acid) based injection molded composites. Structure evaluation and mechanical performance ». *Composites Engineering*, 163, 655-668, **2019**.
- [6] N. Pal, L. Aggarwal, VK. Gupta, « Tensile behavior of sisal/hemp reinforced high density polyethylene hybrid composite ». *Materials Today: Proceedings*, 2, 3140-3148, **2015**.
- [7] AA. Perez-Fonseca, M. Arellano, D. Rodrigue, R. Gonzalez-Nunez, JR. Robledo-Ortiz, « 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**.
- [8] A.M. Radzi, S.M. Sapuan, M. Jawaid and M.R. Mansor, « Mechanical performance of roselle/sugar palm fiber hybrid reinforced polyurethane composites ». *Bioresource*, 13(3), 6238-624, **2018**.
- [9] IV. Surendra, K. Venkateswara, KV. Rao, PP. Chandu, « Fabrication and Investigation of Mechanical Properties of Sisal, Jute & Okra Natural Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites ». *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 19, 2231-5381, **2015**.

- [10] R.B. Yusoffa, H. Takagib, A.N. Nakagaito, « Tensile and flexural properties of polylactic acid-based hybrid green composites reinforced by kenaf, bamboo and coir fibers ». *Industrial Crops and Products*, 94, 562–573, **2016**.
- [11] Darshil U. Shah, « Developing plant fiber composites for structural applications by optimizing composite parameters: a critical review ». *Journal of Materials Science*, 48, 6083–6107, **2013**.
- [12] R.M. Daniella, JF.M. Araujo, S.L. Gabriella, « Mechanical Properties of the Palm Fibers Reinforced HDPE Composites ». *Journal of Chemical and Molecular Engineering* .**Vol.09**, **2015**.
- [13] R. Carla, S. Felipe, R. Nonato, « Composites polymères renforcés avec des tissus de fibres hybrides». *Mater Res* **2017**.
- [14] FZ. Arrakhiz, M. El Achaby, AC. Kakou, S. Vaudreuil, K. Benmoussa, R. Bouhfid, O. Fassi-Fehri, A.Qaiss, « Propriétés mécaniques du polyéthylène haute densité renforcé de fibres de coco modifiées chimiquement : impact des traitements chimiques ». *Mater Des* 37: 379–383,**2012**.
- [15] FZ. Arrakhiz, M. Malha, R. Bouhfid, K. Benmoussa, A. Qaiss , « Propriétés de traction, de flexion et de torsion du polypropylène renforcé d'alfa, decoco et de bagasse traité chimiquement ». *Compos Partie B Eng* 47:35–41, **2013a**.
- [16] FZ. Arrakhiz, K. Benmoussa, R. Bouhfid, A. Qaiss, « Composite hybride fibre/argile pomme de pin : propriétés mécaniques et thermiques ». *Mater Des* 50: 376–381, **2013b**.
- [17] FZ. Arrakhiz, M. Malha, R. Bouhfid, K. Benmoussa, A. Qaiss, « Tensile, flexural and torsional properties of chemically treated alfa, coir and bagasse reinforced polypropylene ». *Composite Engineering Part B*, 47, 35–41, **2013**.
- [18] AA. Perez-Fonseca, JR. Robledo-Ortiz, DE. Ramirez-Arreola, P. Ortega-Gudino, D. Rodrigue, R. Gonzalez-Nunez, « Effect of hybridization on the physical and mechanical “properties of high-density polyethylene-(pine/agave) composites ». *Materials & Design*, 64, 35–43, **2014**.
- [19] D. M. Panaitescu, M. Iorga, Z. Vuluga, D. Donescu, M. Dan, S. Serban et D. Florea,

« L'effet de l'interface dans les composites de fibres naturelles et de matières plastiques ». Revue Roumaine de Chimie, **Vol.52**, p 409-414, **2007**.

[20] M. Rokbi et H. Osmani, « L'effet des traitements de surface des fibres sur les propriétés mécaniques de composites Polyester-fibres Alfa ». 20^{ème} Congrès Français de Mécanique Besançon, p 263, **2011**.

[21] P. J. Herrera-Franco, A. Valadez-Gonzalez, « Mechanical properties of continuous natural fibre-reinforced polymer composites ». Composites, Part A, **Vol.35**, p 339-345, **2004**.

[22] Nikhil, B. Singh, L. Aggarwal, « Evaluation of Tensile and Flexural Properties of Sisal/Coconut Coir Reinforced with High Density Polyethylene Hybrid Composite ». International Journal of Engineering Research and Technology, 6, **2017**.

CHAPITRE III

*Matériaux utilisés et
techniques expérimentales*

CHAPITRE III**Matériaux utilisés et techniques expérimentales**

Ce chapitre sera consacré à la présentation des différents matériaux utilisés pour l'élaboration des composites à savoir les charges, la matrice utilisée ainsi que les caractéristiques de chacune d'elles, les procédés utilisés pour la préparation des échantillons (formulations) et les différentes techniques d'analyse seront également présentées.

Les étapes de ce travail sont résumées dans l'organigramme suivant :

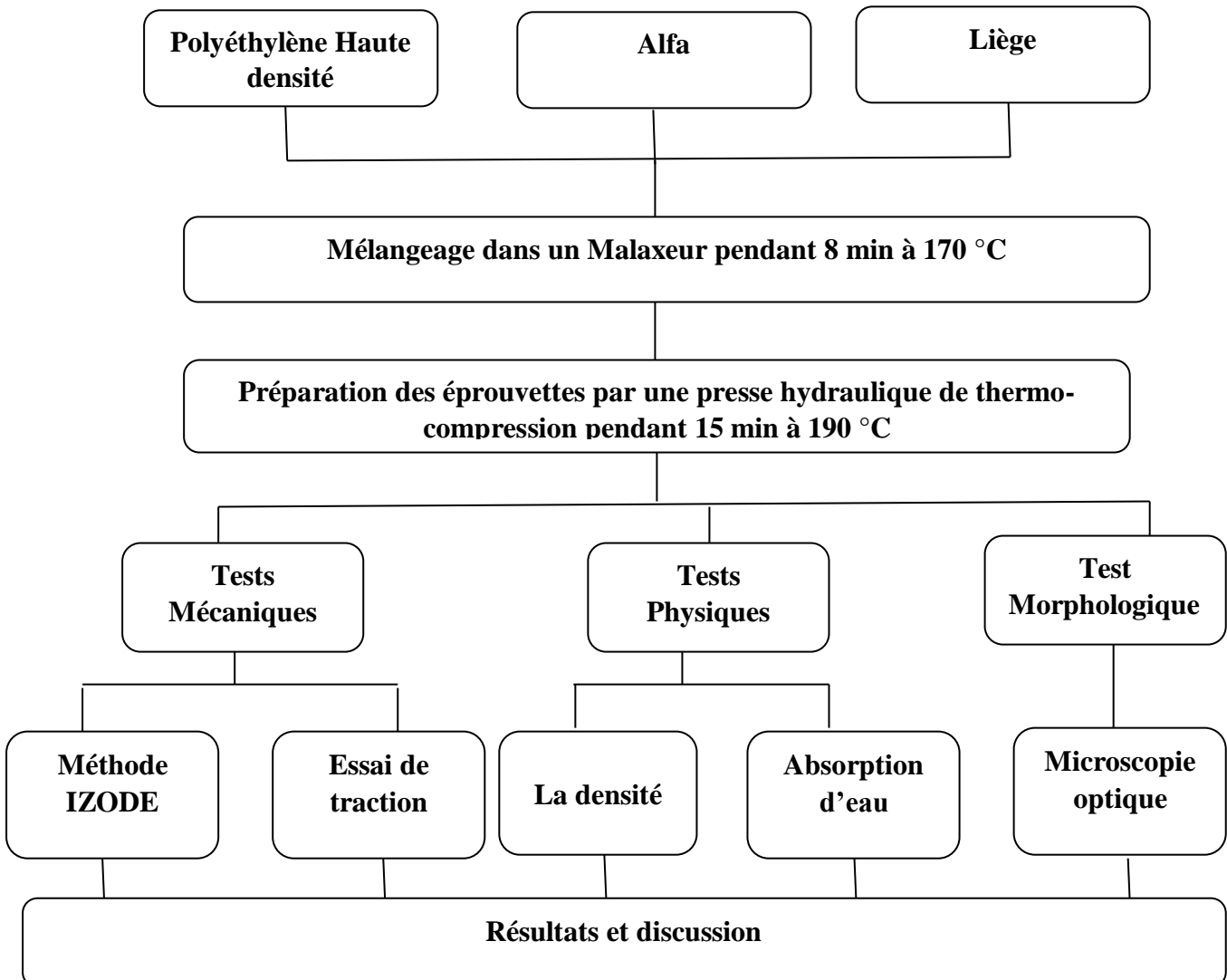


Figure III.1 : Préparation des composites et leurs caractérisations.

III.1. Matériaux utilisés

III.1.1. Polyéthylène haut densité (PEHD)

Le polymère utilisé est le polyéthylène haute densité de type PEHD 5502. Produit par le complexe CP2K (Skikda), commercialisé sous forme de poudre d'une couleur blanche, comme l'indique la **figure III.2**.



Figure III.2 : Photo représentatif du PEHD 5502 sous forme poudre.

Les principales caractéristiques physiques de ce polymère sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Principales caractéristiques du PEHD 5502 [1].

Caractéristiques	Méthodes	Valeur
Indice de fluidité (2.16 kg/190°C)	ASTM D1238	0,35 g/10 min
Densité (23°C)	ASTM D1505	0,955 g/cm ³
Dureté, Shore D	ASTM D2240	67
Résistance à la traction à la rupture (50mm/min)	ASTM D 638 (Type IV)	28 MPa
Elongation à la rupture (50mm/min)	ASTM D 638 (Type IV)	> 600 %
Module de flexion	ASTM D 790	1200 MPa
Température de fusion	-	194 à 216 °C

III.1.2. Préparation des Charges

III.1.2.1. Préparation de la charge d'alfa à partir de la tige

La charge naturelle utilisée dans ce présent travail est la fibre d'alfa achetées à l'herboristerie.

❖ Etape 1 : Lavage des tiges d'alfa

Il est fort probable que les tiges d'alfa contiennent de la poussière et parfois d'autres impuretés. Le lavage à l'eau est nécessaire afin d'éliminer ces impuretés et d'avoir des tiges propres et utilisables.

❖ Etape 2 : Séchage et découpage

Les tiges lavées ont été laissées à l'air libre pendant 4 jours pour qu'elles soient séchées, et réduire ainsi le taux d'humidité. Ensuite, les tiges ont été découpées de façon à obtenir des longueurs de tiges entre 3 et 4 cm.

❖ Etape 3 : Broyage et tamisage

Les tiges d'alfa sont découpées. Cette opération est suivie d'un broyage pour obtenir une poudre d'un diamètre de 90 μm .



Figure III.3 : Préparation physique de la fibre d'alfa : (a) les tiges d'alfa récoltées, (b) la fibre d'alfa découpée, (c) la fibre d'alfa broyée et tamisée.



Figure III.4 : Une tamiseuse automatique.

III.1.2.2. Préparation de la poudre de liège

Dans cette étude, la farine de liège utilisée comme 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 broyées par moulins personnalisés, une farine très fine est récupérée. Celle-ci a subi une analyse granulométrique au niveau du laboratoire de Génie civil, en utilisant une tamiseuse automatique de type AS200 BASIC, pendant 15min, pour sélectionner une fraction d'un diamètre de 90 μm .



Figure III.5 : Poudre de liège.

III.2. Techniques expérimentales

III.2.1. Préparation des composites PEHD/Liège/Alfa

III.2.1.1. Le calandrage

Les pré-mélanges PEHD/Alfa, PEHD/Liège, PEHD/Liège/Alfa sont réalisés dans un mélangeur à double cylindre (Calandre) de marque IQAP LAP **figure III.6** à l'unité « CP2K, Skikda ». La vitesse de rotation des deux cylindres est de l'ordre de 32 tr/mn et leur température à été fixée à 170°C. Après 8min, on récupère les films des composites de 1mm d'épaisseur **figure III.7** qui vont servir à la préparation des différents échantillons par le procédé de moulage par compression.



Figure III.6 : Vue d'ensemble de la calandre utilisée lors de la préparation des composites.



Figure III.7 : Les films des composite PEHD/Alfa, PEHD/Liège, PEHD/Liège/Alfa.

III.2.1.2. Moulage par compression

Les films obtenus par calandrage sont découpés en petits morceaux puis introduits entre les deux feuilles de téflon isolant intercalées entre deux plaques métalliques d'une presse hydraulique de marque CARVER **figure III.8**, chauffés à une température de 190°C, pendant

un temps de séjour de 15min. Différentes formes d'échantillons d'épaisseur de 3mm sont obtenues qui feront l'objet de différentes caractérisations



Figure III.8 : La presse hydraulique. **Figure III.9 :** Préparation des éprouvettes.

Les différentes formulations choisies pour la préparation de nos échantillons sont données dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Composition des différentes formulations.

Composition	1	2	3	4
PEHD (%)	100	80	80	80
Liège (%)	0	20	0	10
Alfa (%)	0	0	20	10

III.3. Techniques de caractérisation des matériaux élaborés

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

III.3.1. Caractérisation physique

III.3.1.1. Détermination de la densité

La densité apparente est mesurée par la méthode pycnométrique, selon la norme NFT51-063. L'éthanol est le solvant de déplacement utilisé qui assure une bonne mouillabilité de l'échantillon, exprimée par **l'équation 1** :

$$d = \frac{\rho(M_2 - M_1)}{(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)} \quad (1)$$

Avec :

ρ : Densité de l'eau ;

M_1 : Poids du pycnomètre à vide ;

M_2 : Poids du pycnomètre contenant la prise d'essai ;

M_3 : Poids du pycnomètre contenant la prise d'essai et l'eau ;

M_4 : Poids du pycnomètre contenant l'eau de déplacement [2].

III.3.1.2. Absorption de l'eau

Les échantillons produits ont été placés dans une étuve à 100°C pendant 4h, pour s'assurer qu'ils sont complètement secs, puis placés dans un dessiccateur pour les refroidir. Après refroidissement, leur poids initial a été prélevé, puis immergé dans l'eau distillée à une température de laboratoire de 27°C. Le pourcentage d'augmentation de leur poids a été mesuré toutes les 24 heures, ce qui représente leur pourcentage d'absorption d'eau pendant cette durée. Toutes les 24 heures, les échantillons étaient retirés de l'eau et rapidement séchés de l'excès d'eau de surface, leur poids était pris dans les 10 à 15 secondes pour éviter une trop grande erreur due à l'évaporation. La différence entre la masse après chaque immersion de 24 h et la masse initiale séchée l'étuve, par rapport à la masse initiale séchée l'étuve a permis de déterminer l'absorption d'eau du composite pour jour-là. Cette valeur a été prise pendant 30 jours pour voir la tendance de l'absorption d'eau dans les composites, les échantillons prélevés sont pesés et la variation de masse est donnée par **l'équation 2** :

$$\Delta m(\%) = \frac{m - m_0}{m} * 100 \quad (2)$$

Avec :

m_0 : La masse des échantillons avant immersion.

m : La masse des échantillons après immersion.

III.3.2. Caractérisation mécanique

III.3.2.1. Méthode IZOD

La méthode la plus courante est connue sous la référence IZOD (ISO 180). Elle est très

utilisée aux Etats-Unis (ASTM D-256), mais limitée en France à la caractérisation des polystyréniques (T51-911 identique à la norme ISO 180 et voisine de la norme ASTM D-256).

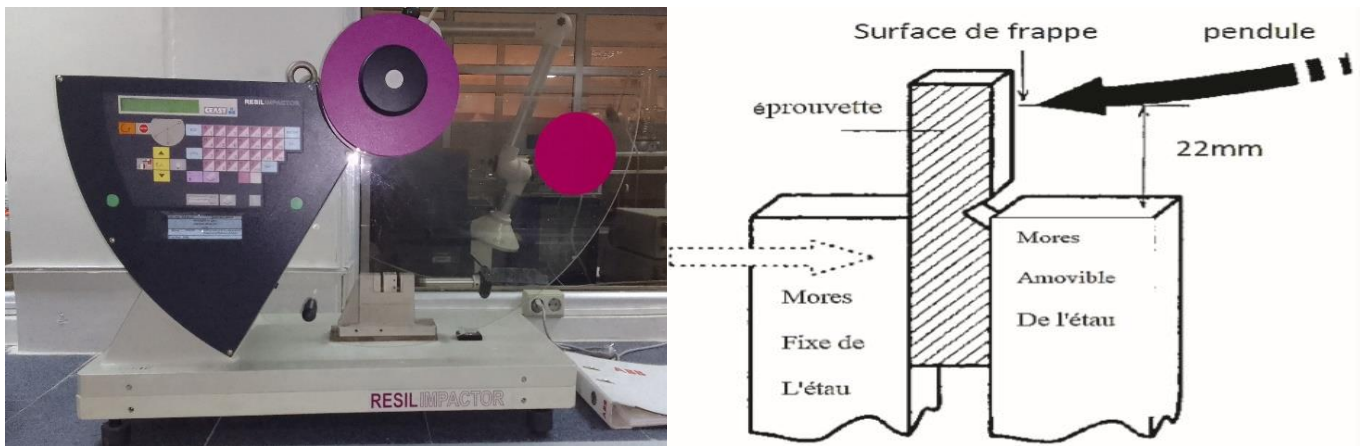


Figure III.10 : Appareillage et Agencement expérimental pour le calcul de la résilience IZOD.

A partir d'une plaque de 3 mm d'épaisseur on confectionne des échantillons de dimensions : $L = 130$ mm et $l = 9,1$ mm à partir de découpeuse sur les quels une entaille centrale (en V) de 2,5 mm de profondeur est réalisée. Les **figure III.11** et **figure III.12** montrent les éprouvettes avant et après le test. Pour un souci de reproductibilité des résultats, trois essais sont réalisés et la valeur moyenne est retenue.

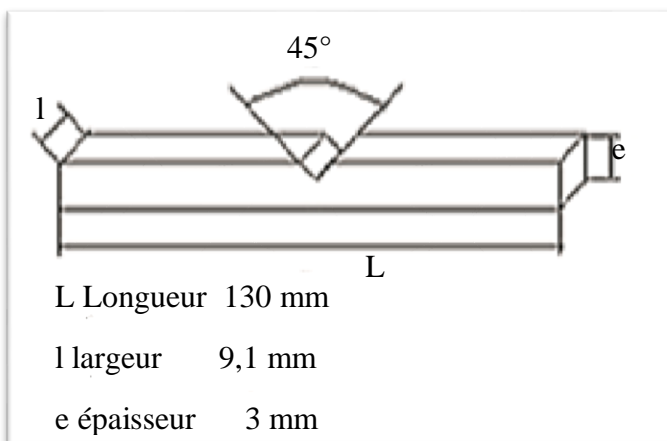


Figure III.11 : Epreuve avant le test.

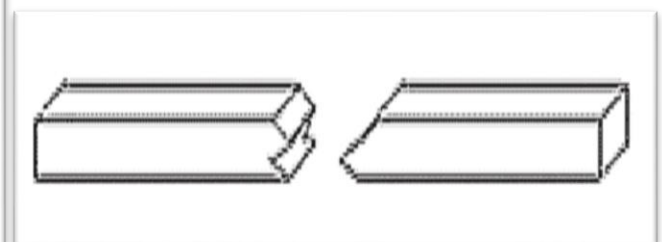


Figure III.12 : Epreuve après le test.

III.3.2.2. Essai de traction

Les propriétés mécaniques d'un matériau sont généralement déterminées à partir de forces extérieures qu'on applique sur le matériau. Ces propriétés dépendent de la température

d'utilisation, de l'état de surface, des conditions d'applications et de la vitesse de déformation. Elles sont déterminées, avec un intervalle de précision, au moyen d'essais normalisés.

L'essai en traction simple est un essai très répandu pour la caractérisation des matériaux. Il consiste en un allongement forcé d'une éprouvette en mesurant en même temps la force nécessaire à chaque instant. Le résultat d'un tel essai est la contrainte nominale σ , **équation 3** en fonction de la déformation nominale ε , **équation 4**, ce qui est résumé dans une courbe de traction **figure III.12**.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

$$\varepsilon(\%) = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100 \quad (4)$$

Où :

F : Force

A : Surface

L : Longueur de l'échantillon

L₀ : Longueur initiale de l'échantillon

σ : Contrainte

ε : Allongement

Les courbes typiques $\sigma = f(\varepsilon)$ obtenues pour les différents matériaux sont représentés sur la **figure III.13**.

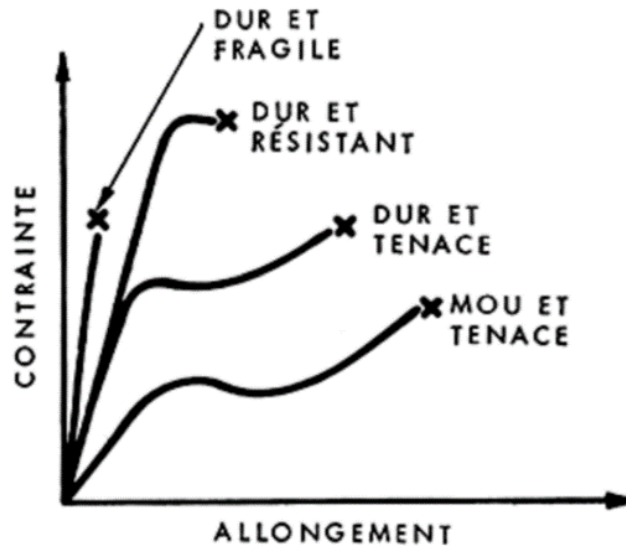


Figure III.13 : Courbes typiques d'essais de traction pour différents matériaux [3].

La mesure des propriétés mécaniques à la rupture des échantillons est réalisée avec une machine de traction de marque TesT GmbH **figure III.14** à la température ambiante sur des échantillons découpés sous forme d'haltères de type « H » **figure III.15**, selon la norme ASTM D638. La vitesse de déformation est fixée à 20 mm/min. Le traitement des résultats expérimentaux a été fait à l'aide d'un logiciel de type Test TWinner 950 [2].

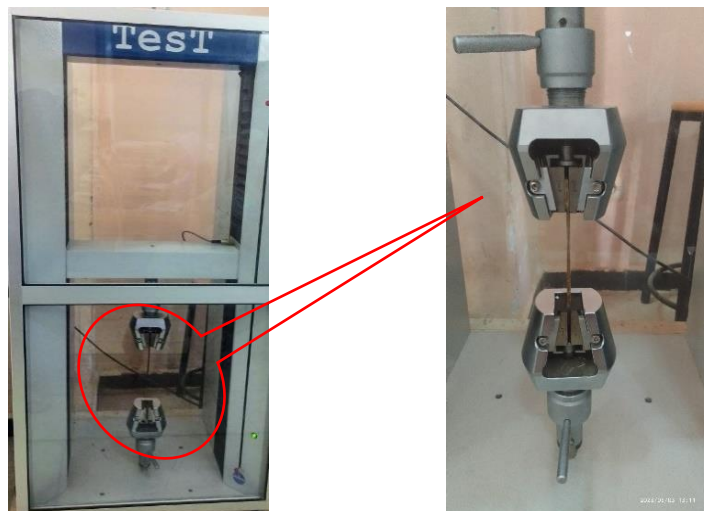


Figure III.14 : Vue d'ensemble de la machine de traction TesT GmbH.



Figure III.15 : Echantillon sous forme d'haltère.

III.3.3. 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. L'appareillage utilisé est un microscope optique de marque OPTIKA Microscopes ITALY.



Figure III.16 : L'appareillage de microscope optique.

Références bibliographiques

- [1] I. Boughrara, « Élaboration et Caractérisation des composites : PE/PE-g-MA/CaCO₃ ». Mémoire de master, université de 20 Aout 1955 Skikda, **2016**.
- [2] B. DAIRI, « Effet de la taille des fibres lignocellulosiques sur les propriétés thermiques et mécaniques des composites polychlorure de vinyle/farine de bois ». Thèse de magister, Université de Bejaïa, **2010**.
- [3] A. Koubaa, A. Cloutier, E. Villeneuve, « Potentiel de l'écorce pour la fabrication de panneaux composites par extrusion ». Présentation au 72e congrès de l'ACFAS, Montréal, 10-14 mai **2004**.

CHAPITRE IV
Résultats et Discussion

CHAPITRE IV

Résultats et discussion

Les résultats obtenus des différents tests effectués, sont présentés et discutés dans ce chapitre. Les propriétés physiques, mécaniques, morphologique ont été étudiées pour un matériau composite hybride à base d'une matrice PEHD renforcé par des fibres de liège et d'alfa.

IV.1. Caractérisation de différents composites élaborés

IV.1.1. Caractérisations physiques

IV.1.1.1. Teste de la 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 liège et de la farine d'alfa permet de prévoir la masse d'une construction à base de ces matériaux. En effet la **figure IV.1** montre l'évolution de la densité de différents composites élaborés.

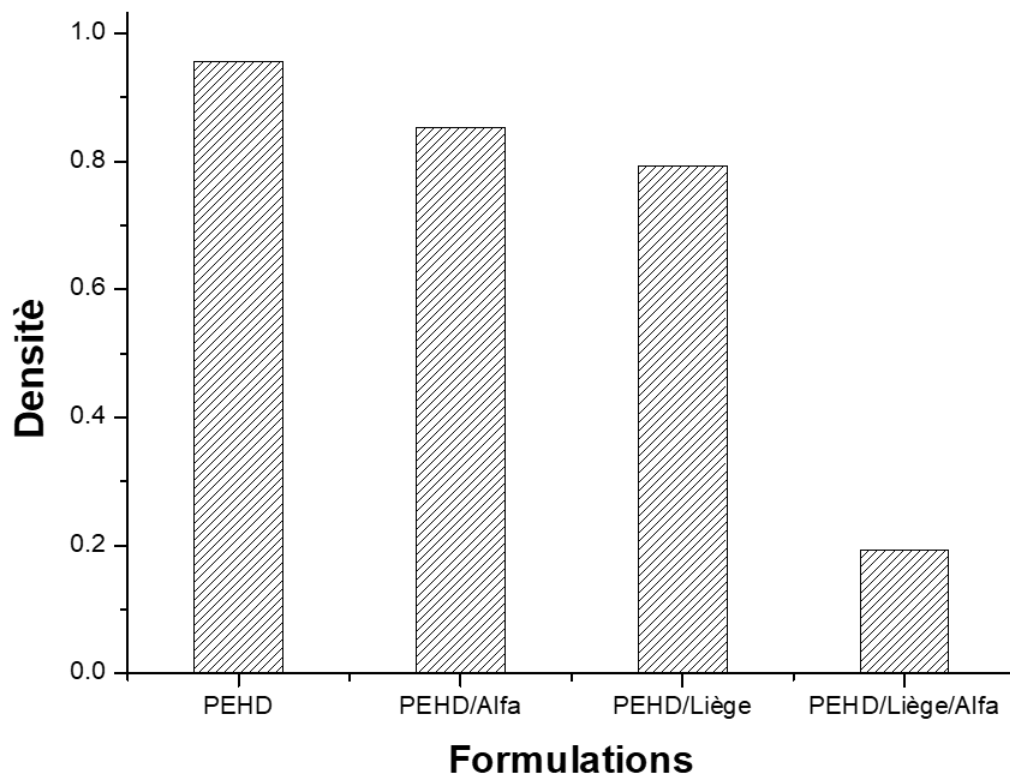


Figure VI.1 : Evolution de la densité de différentes formulations PEHD, PEHD/Alfa, PEHD/Liège, PEHD/Liège/Alfa.

La mesure révèle que la densité de la farine de liège et de la farine d'alfa est de l'ordre de 0,631 ; 0,89 respectivement. A cet égard, l'incorporation des deux charges dans le polyéthylène haute densité conduit à l'obtention des composites PEHD/Alfa, PEHD/Liège et PEHD/Liège/Alfa à faible densité. Les résultats trouvés concordent parfaitement avec ceux de **B.DAIRI [1]**.

IV.1.1.2. Test de l'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 des charges 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 [2].

L'évolution du taux d'absorption d'eau des composites PEHD/Alfa, PEHD/Liège, PEHD/Liège/Alfa en fonction du temps, après 20 jours d'immersion dans l'eau distillée est illustrée sur la **figure IV.2**.

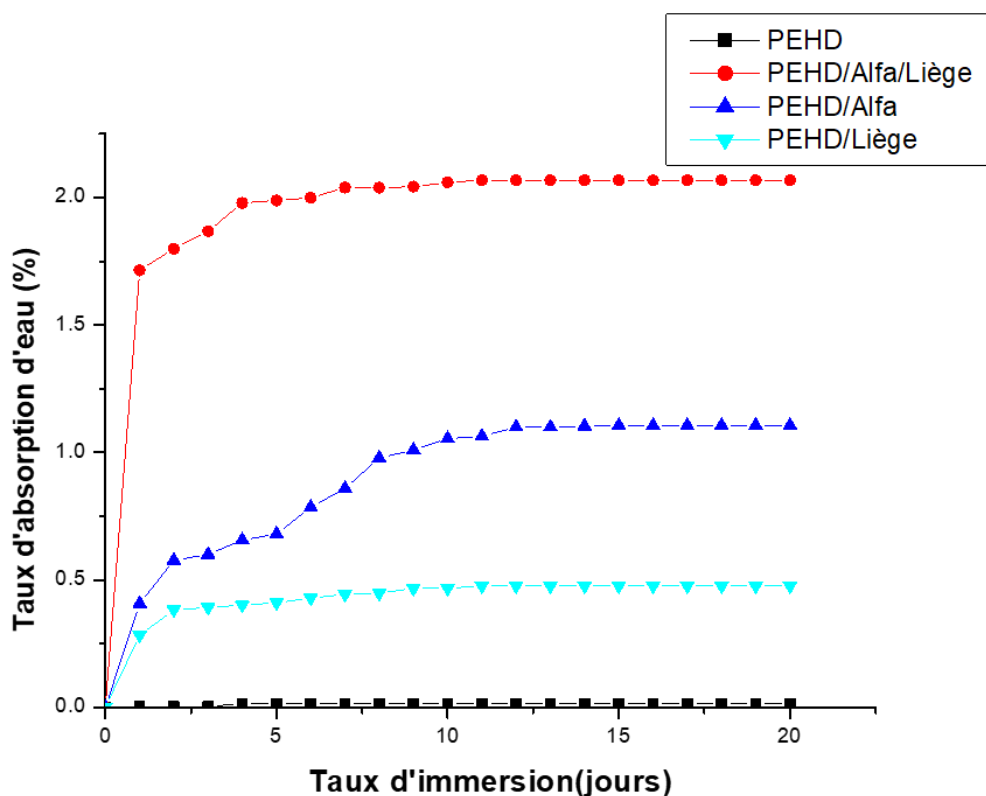


Figure IV.2 : Evolution du taux d'absorption d'eau de différentes formulations PEHD ; PEHD/Alfa ; PEHD/Liège ; PEHD/Alfa/Liège.

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 0,014 % quelque soit le temps d'immersion.

Nous pouvons constater que le composite hybride PEHD/Liège/Alfa 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 charge-matrice se traduisant par l'augmentation de microvides. Pour les composites PEHD/Liège, PEHD/Alfa ont atteint leurs saturations en eau (0,47%, 1,10 % respectivement) au bout de 20 jours d'immersion. En revanche, Le composite hybride PEHD/Liège/Alfa atteint un maximum d'absorption (2,06 %) au bout de 20 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. Les résultats obtenus sont en accord avec des travaux effectués par [3].

IV.1.2. Caractérisations mécaniques

L'intérêt de l'incorporation de charge ou de 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.

IV.1.2.1. 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 entaillé [2].

Les résultats de la résistance au choc IZOD avec entaille de différents composites élaborés PEHD/Liège, PEHD/Alfa, PEHD/Liège/Alfa sont représentés sur la **figureIV.3**.

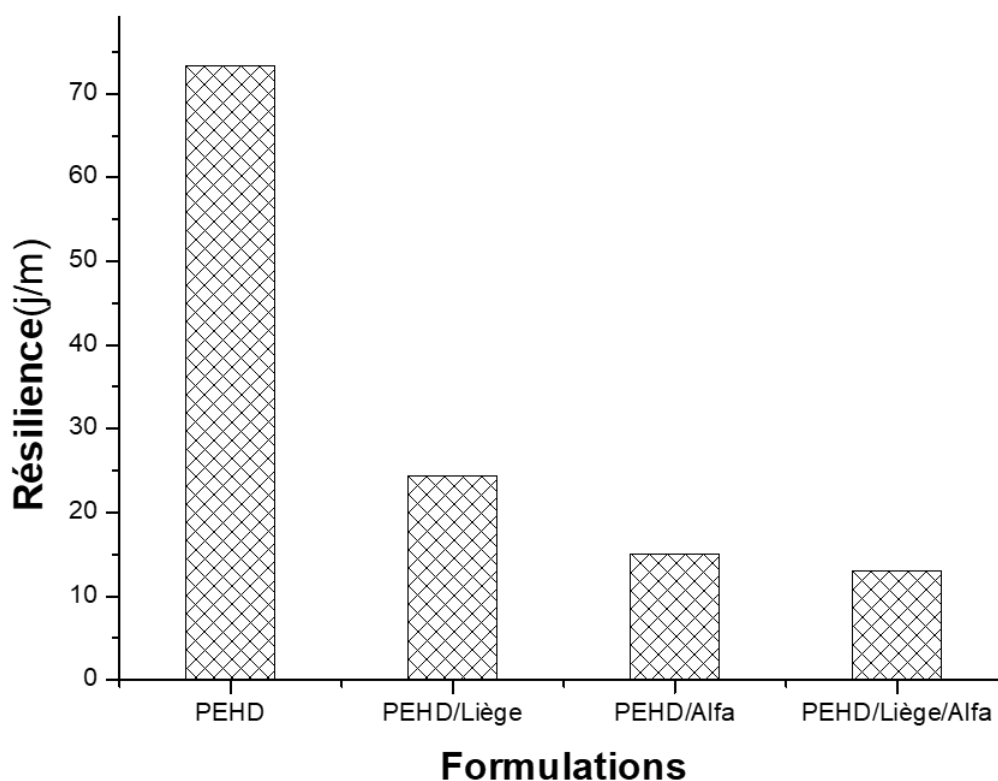


Figure IV.3 : Evolution de la résilience de différentes formulations PEHD, PEHD/Alfa, PEHD/Liège, PEHD/Alfa/Liège.

D'après la **figure IV.3**, les composites PEHD/liège, PEHD/Alfa et PEHD/Liège/Alfa ont des valeurs de la résistance au choc plus faible en comparant à celle du PEHD vierge. Donc le liège et l'alfa 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 expliquée par les faibles interactions entre la matrice et les différentes charges, donc une mauvaise adhésion interfaciale. Ceci a été déjà confirmé par le travail de **Andrzej K. Bledzki [4]**.

IV.1.2.2. Essai de traction

IV.1.2.2.1. Evolution de la contrainte à la rupture

L'évolution de la contrainte à la rupture des composites PEHD/liège, PEHD/Alfa et PEHD/Liège/Alfa est illustrée sur la **figure IV.4**.

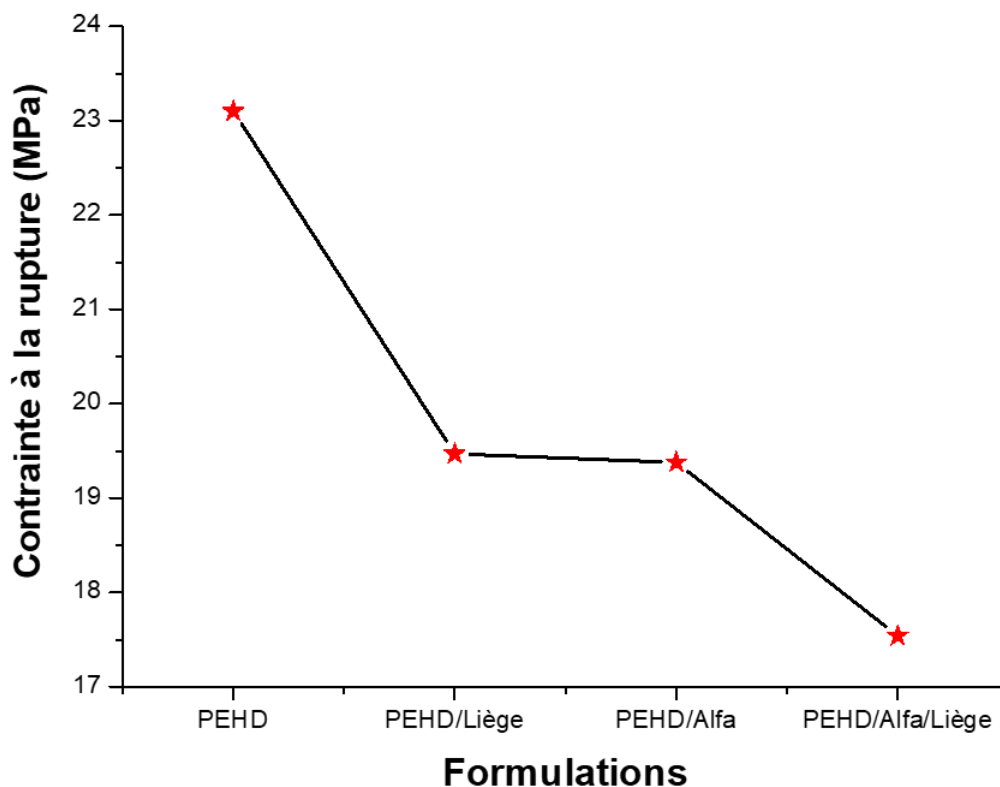


Figure IV.4 : Evolution de la contrainte à la rupture de différentes formulations PEHD, PEHD/Alfa, PEHD/Liège, PEHD/Alfa/Liège.

On constate une diminution de la contrainte à la rupture pour les différents composites chargés avec la farine de liège, la farine d'Alfa et la farine de liège-Alfa comparé au PEHD non

chargé. Ces résultats sont prévisibles et sont en accord avec beaucoup de travaux de **NM .Stark, R. E. Rowlands [5], B. Sanschagrin [6] et J. Simonsen [7]**. Ils ont attribué cette baisse à la diminution de la force de liaison entre les charges et la matrice qui obstrue la propagation d'effort et par la tendance à se regrouper en formant des agglomérats qui induisent des hétérogénéités et un transfert de contrainte non uniforme au sein de la matrice, par conséquent il se produit une fragilisation du matériau composite. Il s'ajoute à cela une faible adhésion interfacial PEHD/liège, PEHD/Alfa et PEHD/Liège/Alfa cause du caractère antagoniste (matrice PEHD hydrophobe, les charges FL et FA hydrophile). Ces résultats s'accordent avec ceux présentés par **K. Oksman, C. Clemons [8]**.

IV.1.2.2.2. Evolution du module d'Young

La **figure IV.5** met en évidence l'évolution du module d'Young des différents composites élaborés.

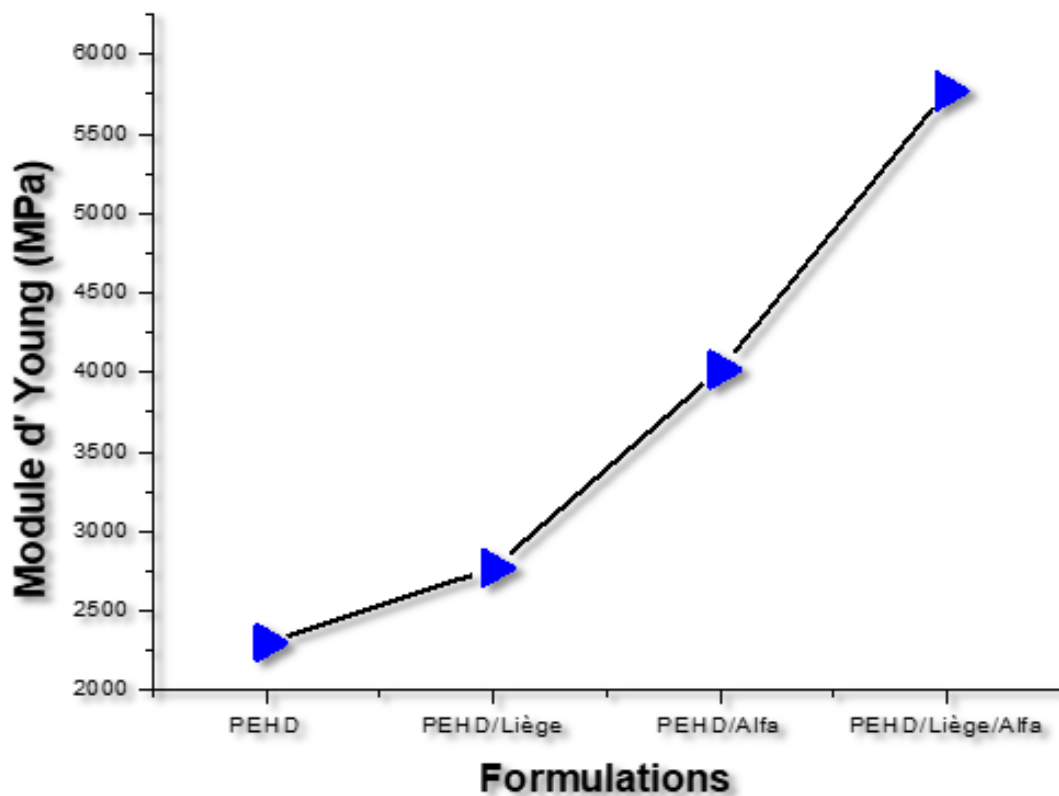


Figure IV.5 : Evolution du module d'Young des différents composites
PEHD ; PEHD/Alfa ; PEHD/Liège ; PEHD/Alfa/Liège.

L'introduction de la farine de liège, la farine d'alfa et la farine de liège-Alfa dans la matrice PEHD augmente la rigidité du matériau, et réduit leur élasticité. Autrement dit le module d'Young augmente et cette augmentation est d'autant plus importante pour le composite

hybride PEHD/Liège/Alfa. Cela s'explique par le fait que les particules de liège et d'alfa de caractère rigide ont tendance à former une armature à l'intérieur des composites conduisant à une grande résistance. C'est ce qu'ont remarqué **NM. Stark, R. E. Rowlands [5]**.

IV.1.2.2.3. Evolution de l'allongement à la rupture

La variation de l'allongement à la rupture des composites PEHD/liège, PEHD/Alfa et PEHD/Liège/Alfa est illustrée sur la **figure IV.6**.

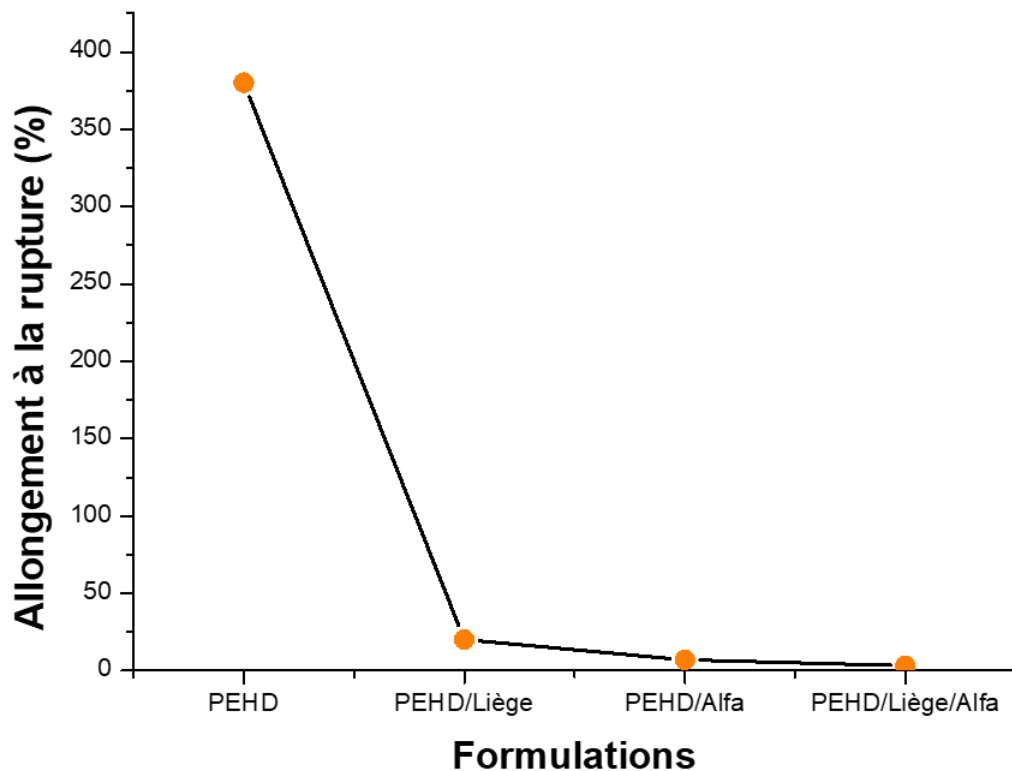


Figure IV.6 : Evolution de l'allongement à la rupture des différentes formulations PEHD, PEHD/Alfa, PEHD/Liège, PEHD/Alfa/Liège.

On observe une diminution de l'allongement à la rupture pour les composites PEHD/Alfa, PEHD/Liège en comparant à ceux de PEHD vierge, cette diminution est plus importante pour le composite hybride PEHD/Alfa/Liège. Ce constat est en parfait accord avec beaucoup d'auteurs, tel que celui **B. A. Acha et al [9]**, **T. T. L. Doan et al [10]**, **S. J. Kim et al [11]**. La détérioration de cette propriété est principalement due à l'incorporation de la farine de liège et la farine d'alfa de caractère rigide dans la matrice PEHD, ce qui réduit la mobilité des chaînes polymériques, ce qui accélère la rupture des éprouvettes à de faibles contraintes.

IV.1.3. Caractérisation de l'état de dispersion de farine de liège, farine d'alfa et farine Liège-Alfa dans la matrice polyéthylène haute densité

Parmi les techniques de caractérisation utilisées habituellement dans l'étude de la qualité de l'interface charge/matrice, en particulier les charges 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.1.3.1. Analyse de la morphologie par microscopie optique

Les changements induits par l'incorporation de la farine de liège, la farine d'alfa et la farine Liège-Alfa 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/Alfa et PEHD/Liège/Alfa sont représentées sur les **figures IV.7 et IV.8** respectivement.

La **figure IV.7** représentant la micrographie de la surface du PEHD vierge, montre un état de surface homogène.



Figure IV. 7 : Micrographie en microscopie optique de la surface PEHD Vierge.

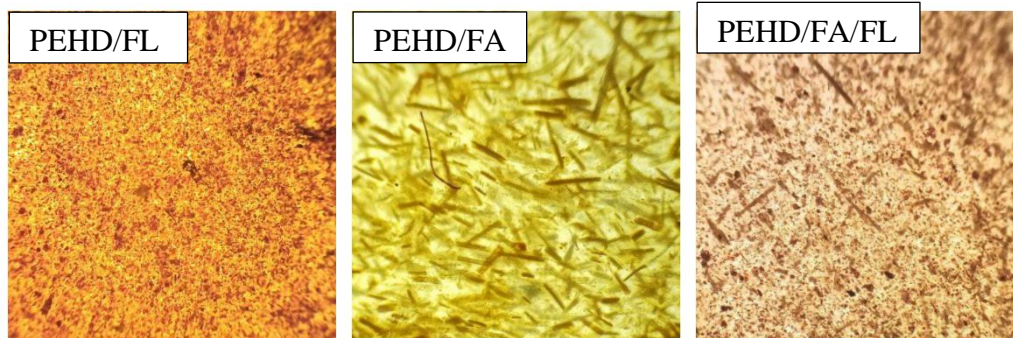


Figure IV. 8 : Micrographie en microscopie optique des surfaces des composites PEHD/Liège, PEHD/Alfa et PEHD/Liège/Alfa.

Les micrographes des composites de la **figure IV.8** relatifs à l'incorporation de la farine de liège, de la farine d'alfa et la farine de liège-Alfa 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/Alfa. Ceci est dû à l'incompatibilité des deux phases en raison de la faible adhésion interfaciale entre la farine de liège et la farine d'alfa à caractère hydrophile et le PEHD à caractère hydrophobe.

Ces résultats sont en bonne concordance avec ceux rapportés par **B. MEGHLOUI [12]**.

Références bibliographiques

- [1] B. DAIRI, « Effet de la taille des fibres lignocellulosiques sur propriétés thermique et mécaniques des composites polychlorure de Vinyle / Farine de bois ». Thèse de magister, Université de Bejaïa, **2010**.
- [2] S. Krim, « Etude et caractérisation des matériaux composites à base de polypropylène chargé avec la farine de grignon d'olive ». Mémoire de Magister, Université Abderrahmane Mira Bejaïa, **2009**.
- [3] N. DJILALI, « Etude et valorisation du grignon d'olive dans le domaine des composites ». Mémoire de Magister, Université Abderrahmane Mira Béjaïa, **2008**.
- [4] A.K. Bledzki, M. Letman, A. Viksne, L. Rence, « A comparison of compounding processes and wood type for wood fibre-PP composites ». *Composites, Part A* 36, 789–797, **2005**.
- [5] NM. Stark, R. E. Rowlands, « Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites ». *Wood and fiber science*, 35, 167- 174, **2003**.
- [6] B. Sanschagrín, S. T. Sean, B. V. Kokta, « Mechanical properties of cellulose fibers reinforced thermoplastics ». Proceedings of the 43rd annual conference, composite institute. Cincinnati, OH, États-Unis, 1-5 février, **1988**.
- [7] J. Simonsen, « Efficiency of reinforcing materials in filled polymer composites ». *Forest Products Society*, 47, 74-81, **1997**.
- [8] K. Oksman, C. Clemons, «Mechanical properties and morphology of impact modified polypropylene-wood flour composites». *J. App. Polym. Sci*, 67, 1503- 1513, **1998**.
- [9] B. A. Acha, M. M. Reboredo, N. E. Marcovich, «Effect of coupling agents on the thermal and mechanical properties of polypropylene–jute fabric composites». *Polym. Inter*, 55, 1104–1113, **2006**.
- [10] T. T. L. Doan, S. L. Gao, E. Mader, «Jute /PP composites, Effect of matrix modification». *Compos. Sci. Tech*, 66, 952-963, **2006**.
- [11] 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**.

[12] B. MEGHLAOUI, «Elaboration et caractérisation d'un composite biodégradable à matrice polymère et renfort naturel ». Mémoire de Doctorat, université MOULOUD MAMMARI de Tizi-Ouzou, **2020**.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

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 compression).

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

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/Alfa, PEHD/Liège/Alfa est nettement inférieure à celle de PEHD vierge on peut dire que les charges utilisées confères aux composites élaborés une légèreté.
- Le taux d'absorption d'eau des composites élaborés PEHD/Liège, PEHD/Alfa, PEHD/Liège/Alfa dépend du temps d'immersion et la nature de la charge incorporée dans la matrice polymère.

- La caractérisation mécanique des composites élaborés a permis de déduire que :

- La résilience les différents composites élaborés PEHD/Liège, PEHD/Alfa, PEHD/Liège/Alfa a diminué par rapport à celle de PEHD vierge.
- Le comportement mécanique des composites PEHD/Liège, PEHD/Alfa, PEHD/Liège/Alfa montre que la contrainte et l'allongement à la rupture diminuent, alors que le module d'élasticité augmente progressivement.

-La caractérisation de la morphologie par la microscopie optique de la matrice de PEHD, montre une surface homogène et régulière contrairement aux composites à base de la farine de liège, de la farine d'alfa et la farine de liège-Alfa dans la matrice PEHD, décrivent nettement une surface hétérogène, irrégulière et la présence d'agrégats.

Perspectives

PERSPECTIVES

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

- ✓ Améliorer l'adhésion interfaciale des composites PEHD/FL ; PEHD/FA ; PEHD/FA/FL par l'introduction d'un agent de couplage ou un agent comptabilisant.
- ✓ Etudier des propriétés thermiques par analyse calorimétrique différentielle à balayage (DSC) et analyse thermogravimétrique (ATG).
- ✓ Elaborer des matériaux composites PEHD/FL ; PEHD/FA ; PEHD/FA/FL par les procédés d'extrusion et d'injection.
- ✓ Etudier la biodégradation des composites PEHD/FL ; PEHD/FA ; PEHD/FA/FL.

Résumé

L'utilisation de fibres végétales dans l'élaboration d'un matériau composite présente de nombreux avantages tels que les impacts environnementaux faibles et les bonnes propriétés mécaniques spécifiques. L'objectif principal poursuivi au cours de cette étude était l'élaboration d'un nouveau matériau composite hybride à base de charges (Polyéthylène haute densité/Liège/Alfa). Dans ce contexte, différentes formulations à base de polyéthylène haute densité/farine de Liège et farine d'Alfa ont été préparées. Les composites PEHD/Liège, PEHD/Alfa, PEHD/Liège/Alfa ont initialement été malaxés dans le malaxeur à deux cylindres avant de préparer des éprouvettes d'une épaisseur moyenne de 2 et 3mm par compression à 190°C. Ces derniers ont été caractérisés par diverses techniques : tests mécaniques ; physiques et morphologique.

Mots clés : Composites hybrides, hybridation, PEHD, Liège, Alfa.

Abstract

The use of plant fibers in the development of a composite material has many advantages such as low environmental impacts and good specific mechanical properties. The main objective followed during this study was the development of a new hybrid composite material based on fillers (High density polyethylene/Cork/Alfa). In this context, different formulations based on high density polyethylene /Cork bran flour and Alfa flour were prepared. The HDPE/Cork, HDPE/Alfa, HDPE/Cork/Alfa composites were initially mixed in the two-roll mixer before preparing specimens with an average thickness of 2 and 3mm by compression at 190°C. These were characterized by various techniques: mechanical; physical tests and morphological.

Key words: Hybrid composites, hybridization, HDPE, Cork, Alfa.

المخلص

استخدام الألياف النباتية في تطوير المواد المركبة له العديد من المزايا مثل التأثيرات البيئية المنخفضة والخصائص الميكانيكية المحددة الجيدة. كان الهدف الرئيسي للمتابعة خلال هذه الدراسة هو تطوير مادة مركبة هجينة جديدة تعتمد على مواد الحشو (مصفوفة البولي إيثيلين عالية الكثافة/الفلين/الحلفاء). في هذا السياق تم تحضير تركيبات مختلفة تعتمد على دقيق البولي إيثيلين عالي الكثافة ودقيق الفلين ودقيق الحلفاء. تم خلط مركبات البولي إيثيلين عالي الكثافة / الفلين؛ البولي إيثيلين عالي الكثافة /الحلفاء والبولي إيثيلين عالي الكثافة /الفلين / الحلفاء مبدئياً في الخلاط ثنائي الأسطوانة قبل تحضير العينات بمتوسط سمك 2 و3 مم عن طريق الضغط عند 190 درجة مئوية. وقد تميزت هذه بتقنيات مختلفة الاختبارات الميكانيكية؛ الفيزيائية والشكلية.

الكلمات المفتاحية: المركبات الهجينة، تهجين، البولي إيثيلين عالي الكثافة، الفلين، الحلفاء.