

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des matériaux

Présenté par :

Aissaoua Mohamed, Benchohra Mostapha & Doubakh Hamza

Thème

*ÉLABORATION ET CARACTERISATION D'UN
NOUVEAU MATERIAU A BASE DE DECHETS
PLASTIQUES ET DE LIEGE*

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Hocine Mustapha	MCB	Président
Mekideche Salih	MCB	Encadrant
Rokbi Mansour	Prof	Co- Encadrant
Bechane Leila	MCA	Examinateur

Année Universitaire : 2024 / 2025

N° d'ordre : GM/...../2025

Remerciement

*Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à **Dr. Mekidech**, mon encadrant, pour son accompagnement tout au long de ce travail. Sa rigueur scientifique, sa disponibilité et ses conseils avisés ont été d'un grand apport dans la réalisation de ce mémoire.*

*Je remercie également mon co-encadrant **Pr. Rokbi**, pour ses orientations précieuses, son soutien constant et ses remarques constructives qui m'ont permis d'approfondir ma réflexion et d'enrichir ce travail.*

*Je souhaite également adresser mes vifs remerciements aux membres du jury, **Dr. Mustapha Hocine** et **Dr. Bechane Leila**, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire. Leurs remarques et suggestions seront d'un grand intérêt pour la suite de mes recherches.*

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

إهداء

محمد عيساوة

إلى من غرس في حب العلم، وكان لي نعم السند والداعم،
إلى والدي العزيز رحمه الله، الذي لم يبخل عليّ بدعمه وتضحياته،
وإلى والدي الغالية، التي كانت لي نبع الحنان والدعاء في كل حين،

إلى الزوجة الكريمة وكل أبنائي الأعتز.

إلى أساتذتي الكرام الذين لم يبخلوا بعلمهم ونصحهم،

إلى كل من شجعني وساندني في مسيرتي،

أهدي ثمرة جهدي هذه... عربون تقدير وامتنان

إِذَا زُرْتُمُ الْمَيِّتَ

مُصْطَفَىٰ بْنِ شَهْرَةَ

إِلَىٰ مَنْ زَرَعُوا فِي طَرِيقِي بَدُورَ الْأَمَلِ،
إِلَىٰ مَنْ سَانَدُونِي فِي كُلِّ خَطْوَاتِي،
إِلَىٰ مَنْ كَانَتْ دَعْوَاتُهُمْ سِرَّ نَجَاحِي

إِلَىٰ وَالِدَيَّ الْعَزِيزِينَ



حمزة ووباخ

إلى من كان لهم الفضل بعد الله في كل خطوة خطوتها
إلى من زرعوا في قلبي الأمل، وغرسوا في روحي القوة،
إلى والديّ العزيزين... شكراً على دعمكما الدائم، ودعائكما الذي كان سنداً لي
في كل لحظة.

إلى الزوجة الكريمة والى أبنائي الأعتزاء: تميم، تسنيم
إلى أساتذتي الأفاضل، الذين لم يبخلوا بعلمهم ونصحهم
إلى أصدقائي، شركاء السهر والتعب، والابتسامة في لحظات اليأس
إلى كل من آمن بي، ولو بكلمة

أهديكم ثمرة جهدي وتعب سنواتي... هذه المذكرة

Abstract

In a context of sustainable development and waste reduction, this thesis focuses on the design of a new composite material using plastic waste and cork, two abundant and undervalued resources. The main objective is to develop an innovative and eco-responsible solution by reusing used polymers as a matrix, combined with cork particles as a natural filler. The characterization of the materials obtained was carried out using mechanical tests (tensile strength, bending). This new material has strong potential for applications in construction (insulating panels, lightweight partitions) or furniture, offering an economical and ecological alternative to conventional synthetic materials.

ملخص

في سياق التنمية المستدامة والحد من النفايات، تُركز هذه الأطروحة على تصميم مادة مُركّبة جديدة باستخدام نفايات البلاستيك والفلين، وهما موردان وفيران ولكنهما غير مُقدّرين جيداً. الهدف الرئيسي هو تطوير حل مبتكر وصديق للبيئة من خلال إعادة استخدام البوليمرات المُستعملة كمصفوفة، مع جزيئات الفلين كحشو طبيعي. تم تحديد خصائص المواد المُتحصل عليها باستخدام اختبارات ميكانيكية (قوة الشد، الانحناء). تتمتع هذه المادة الجديدة بإمكانيات كبيرة للتطبيق في مجال البناء (الألواح العازلة، الحواجز خفيفة الوزن) أو الأثاث، مما يُوفر بديلاً اقتصادياً وصديقاً للبيئة للمواد الاصطناعية التقليدية.

Résumé

Dans un contexte de développement durable et de réduction des déchets, ce mémoire porte sur la conception d'un nouveau matériau composite utilisant des déchets plastiques et du liège, deux ressources abondantes et peu valorisées. L'objectif principal est de développer une solution innovante et éco-responsable en réutilisant des polymères usagés comme matrice, combinés à des particules de liège servant de charge naturelle. La caractérisation des matériaux obtenus a été réalisée à l'aide de tests mécaniques (résistance à la traction, flexion). Ce nouveau matériau présente un fort potentiel pour des applications dans le bâtiment (panneaux isolants, cloisons légères) ou l'ameublement, offrant une alternative économique et écologique aux matériaux synthétiques classiques.

Tableauleaue de matière

<i>Introduction générale.....</i>	<i>1</i>
<i>Chapitre I : matériaux composites.....</i>	<i>3</i>
<i>I.1 Introduction.....</i>	<i>3</i>
<i>I.2 Définition.....</i>	<i>3</i>
<i>I.3 Constituants.....</i>	<i>3</i>
<i>I.3.1 Résine.....</i>	<i>3</i>
<i>I.3.1.1 Principales caractéristiques mécaniques des résines.....</i>	<i>4</i>
<i>I.3.2 Fibres.....</i>	<i>5</i>
<i>I.3.2.1 Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base.....</i>	<i>5</i>
<i>I.3.3 Additifs.....</i>	<i>6</i>
<i>I.3.3.1 Types d'additifs utilisés.....</i>	<i>7</i>
<i>I.4 Applications.....</i>	<i>7</i>
<i>I.5 Conclusion.....</i>	<i>9</i>
<i>Chapitre II : Recyclage.....</i>	<i>12</i>
<i>II.1 Introduction.....</i>	<i>12</i>
<i>II.2 Déchets plastiques.....</i>	<i>13</i>
<i>II.2.1 Types de plastiques recyclables.....</i>	<i>13</i>
<i>II.3 Types de déchets plastiques.....</i>	<i>14</i>
<i>II.4 Élimination des déchets plastiques.....</i>	<i>17</i>
<i>II.4.1.1Recyclage.....</i>	<i>19</i>
<i>II.5 Recyclage des déchets plastiques.....</i>	<i>19</i>
<i>II.5.1 Définition.....</i>	<i>19</i>

<i>II.5.2 Étapes du recyclage mécanique des plastiques.....</i>	<i>19</i>
<i>II.6 Recyclage de liège.....</i>	<i>22</i>
<i>II.7 Conclusion.....</i>	<i>24</i>
<i>Chapitre III : Matériaux et méthodes.....</i>	<i>26</i>
<i>III.1 Introduction.....</i>	<i>26</i>
<i>III.2 Déchets plastiques polypropylène pp.....</i>	<i>26</i>
<i>III.3 Liège.....</i>	<i>27</i>
<i>III.3.1 Préparation de liège.....</i>	<i>27</i>
<i>III.3.2 Caractérisation du liège.....</i>	<i>28</i>
<i>III.3.2.1 ATR – FTIR.....</i>	<i>29</i>
<i>III.4 Elaboration des constituants.....</i>	<i>30</i>
<i>III.4 Découpage.....</i>	<i>31</i>
<i>III.5 Essais mécaniques.....</i>	<i>32</i>
<i>III.5.1 Essai de traction.....</i>	<i>32</i>
<i>III.5.1 Essai de flexion.....</i>	<i>33</i>
<i>III.6. Paramètres étudiés.....</i>	<i>34</i>
<i>III.7 Conclusion.....</i>	<i>36</i>
<i>Chapitre IV. Résultats et discussion.....</i>	<i>38</i>
<i>IV. Introduction.....</i>	<i>38</i>
<i>IV.1 Analyse structurale ATR – FTIR.....</i>	<i>38</i>
<i>IV.2 Analyse thermogravimétrique (ATG).....</i>	<i>39</i>
<i>IV.3 Caractérisations mécaniques.....</i>	<i>42</i>
<i>IV.3.1 Propriétés mécaniques en traction.....</i>	<i>42</i>

IV.3.1 Propriétés mécaniques en flexion.....	45
IV.4 conclusion.....	47
Conclusion générale.....	49
Références.....	51
Annexe.....	53

Liste des Figures

<i>Figure. I.1 : (a) Résine thermodurcissable, (b) : Résine thermoplastique.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure.I.2 Différents types de fibres.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure.I.2 Additifs plastiques.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure II.1 Déchets plastiques d'une décharge.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure. II.2 : Déchets industriels.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure. II.3 : Déchets agricoles.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure. II.4 : déchets municipaux.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure. II.5 : Collecte des déchets plastiques.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure. II.6 : Tri des déchets plastiques (a) : Manuel, (b) : Machine de tri.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure. II.7 : Broyage des déchets plastiques.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure. II.8 : Lavage des paillettes plastiques.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure. II.9: Sécheur thermique et mécanique pour tous plastiques.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure. II.10 : Répartition du chêne liège en Algéri.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure. III1 : Polypropylène (PP).....</i>	<i>26</i>
<i>Figure. III.2 : Liège fourni par la collecte se fait dans les forêts de Jijel, en Algérie.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure. III.3 : Liège broyé par la startup de recyclage des déchets de l'Université de M'sila.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure. III.4 : ATR-FTIR.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure. III.5 : ATG.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure. III.6 : Processus d'élaboration de nouveau matériau composite.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure. III 7 : Etapes de découpage.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure. III.8 : Eprouvette de traction selon la norme ISO527-4.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure. III.9: Banc d'essai de traction.....</i>	<i>33</i>

<i>Figure. III.9 : Banc d'essai de flexion.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure. III.10 : Eprouvette de flexion selon la norme ISO178 :2003.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure.IV.1 : Spectres ATR-FTIR de liège utilisé.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure. IV.2 : Courbe ATG de liège utilisés</i>	<i>40</i>
<i>Figure IV.3 : Essai de traction pour les trois mat.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure IV.4 : Différents valeurs de E des matériaux MAT 1, MAT 2 et MAT 3..</i>	<i>44</i>
<i>Figure IV.5 : Différents valeurs des contraintes des matériaux MAT 1, MAT 2</i>	<i>44</i>
<i>Figure IV.6 : Différents valeurs des déformations des matériaux MAT 1, MAT 2 e.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure IV.7 : Essai de flexion pour les trois matériaux</i>	<i>47</i>

Liste des Tableaux

<i>Tableau I.1 : Propriétés mécaniques des résines.....</i>	<i>4</i>
<i>Tableau I.2 : Principales caractéristiques mécaniques des fibres [4].....</i>	<i>6</i>
<i>Tableau II.1 : Plastiques recyclables [6].....</i>	<i>14</i>
<i>Tableau II.2 Déchets commerciaux.....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau III.1 : Proportions des constituants dans le nouveau matériau.....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau.II.1 : Comparaison entre les trois matériaux.....</i>	<i>47</i>

Introduction générale

Introduction générale

Les déchets sont l'ensemble des résidus issus des activités humaine, qu'elle soit domestique, industrielle, agricole ou commerciale. Ils peuvent prendre diverses formes : solides, liquides ou gazeux, et leur accumulation pose un défi majeur pour l'environnement et la santé publique. À l'heure où la production mondiale de déchets ne cesse d'augmenter, la question de leur gestion devient cruciale. Recycler, réduire, réutiliser : autant de solutions envisagées pour limiter l'impact de nos déchets sur la planète. Comprendre les enjeux liés aux déchets est donc essentiel pour construire un avenir plus durable et respectueux de l'environnement.

Aujourd'hui, l'élimination des déchets représente un enjeu majeur pour les sociétés modernes, confrontées à une production croissante de déchets ménagers, industriels et électroniques. Face à l'augmentation constante de la consommation et à l'accélération du rythme de vie, la gestion efficace de ces déchets devient indispensable pour préserver l'environnement, la santé publique et les ressources naturelles [1]. L'élimination des déchets ne se limite pas à leur simple mise en décharge ; elle englobe un ensemble de méthodes, telles que le recyclage, l'incinération, le compostage ou encore la valorisation énergétique. Dès lors, il est essentiel de comprendre les enjeux liés à l'élimination des déchets et d'examiner les solutions durables pouvant être mises en œuvre pour répondre à cette problématique. Il existe différentes méthodes d'élimination des déchets, chacune étant spécifiquement adaptée à la nature des déchets (ménagers, industriels, dangereux, organiques, etc.). Les principales techniques utilisées sont : l'enfouissement, la valorisation énergétique, le compostage, le recyclage et la méthanisation.

La problématique de la gestion des déchets constitue l'un des défis majeurs de notre époque, tant sur le plan environnemental qu'économique. Dans un monde confronté à des défis environnementaux croissants, le recyclage apparaît comme une solution essentielle pour préserver nos ressources naturelles et limiter la pollution. Chaque jour, des tonnes de déchets sont produites, mettant en péril les écosystèmes et contribuant au changement climatique. Face à cette situation, le recyclage permet de donner une seconde vie aux matériaux, de réduire la consommation d'énergie et de diminuer la quantité de déchets envoyés en décharge [2]. Comprendre l'importance du recyclage, ses enjeux et ses mécanismes est donc une étape cruciale vers un mode de vie plus durable et respectueux de l'environnement.

Parmi les déchets existants, les plastiques occupent une place prépondérante en raison de leur usage massif, de leur durabilité et de leur faible taux de biodégradabilité. Leur accumulation dans l'environnement entraîne de graves conséquences pour les écosystèmes et la santé humaine. Parallèlement, le liège, matériau naturel et renouvelable principalement issu de l'écorce du chêne-liège, génère également des résidus lors de sa transformation industrielle, qui sont souvent sous-exploités.

Dans un contexte où l'économie circulaire et la valorisation des déchets deviennent des priorités stratégiques, l'idée de combiner les propriétés des plastiques recyclés avec celles du liège apparaît comme une solution prometteuse pour développer de nouveaux matériaux composites.

Notre mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'introduction générale.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une généralité sur les matériaux composites, en abordant leurs composants, leurs caractéristiques ainsi que leurs principales propriétés. Une attention particulière est accordée aux matériaux constitutifs.

Le troisième chapitre porte sur le recyclage des déchets plastiques ainsi que sur les différentes méthodes d'élimination de ces déchets.

Le quatrième chapitre est dédié aux procédures de fabrication de notre nouveau matériau composite à base de liège et de déchets plastiques.

Dans le cinquième chapitre les résultats obtenus dans le cadre de ce travail y sont présentés et discutés.

Chapitre I
Matériaux composites

Chapitre I : matériaux composites***1.1 Introduction***

Les matériaux composites occupent aujourd'hui une place centrale dans de nombreux domaines industriels grâce à leurs propriétés mécaniques remarquables et leur légèreté. Un matériau composite est constitué de deux ou plusieurs composants distincts, généralement une matrice et un renfort, dont la combinaison permet d'obtenir des performances supérieures à celles des matériaux pris séparément [3]. Ces matériaux sont largement utilisés dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile, du bâtiment, du sport et même de la médecine, en raison de leur capacité à répondre à des exigences spécifiques en matière de résistance, de rigidité et de durabilité. Cette introduction vise à présenter les principes de base des matériaux composites, leur classification, ainsi que les avantages qui motivent leur développement et leur utilisation croissante dans les technologies modernes.

1.2 Définition

Un matériau composite est un assemblage de deux ou plusieurs constituants de nature différente, dont les propriétés se complètent pour former un matériau global aux performances améliorées. Ces matériaux sont conçus pour tirer profit des avantages de chaque composant, tout en minimisant leurs inconvénients [4].

1.3 Constituants

Les matériaux composites sont constitués de deux ou plusieurs constituants principaux dont la combinaison permet d'obtenir un matériau aux propriétés améliorées, supérieures à celles de chaque composant pris individuellement.

1.3.1 Résine

Dans les matériaux composites, la résine est une matrice polymère qui lie les fibres de renforcement (comme le carbone, le verre ou l'aramide) entre elles, leur conférant ainsi une forme cohérente et assurant la transmission des efforts mécaniques entre les fibres [5]. Elle joue également un rôle de protection contre les agressions chimiques, thermiques et mécaniques extérieures.

Il existe plusieurs types de résines utilisées dans les composites, les plus courantes étant (**Figure. I.1**) :

- Résines thermodurcissables : époxy, polyester, vinylester.
- Résines thermoplastiques : polyamide, polypropylène, PEEK.

La performance finale du matériau composite dépend fortement des propriétés de la résine utilisée.

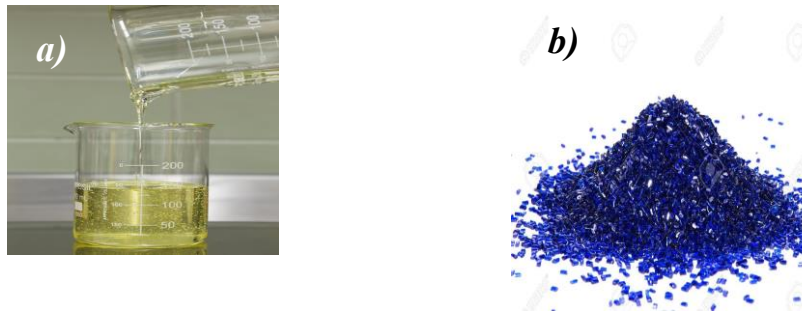


Figure. I.1 : a) Résine thermodurcissable, b) Résine thermoplastique

II.3.1.1 Principales caractéristiques mécaniques des résines

Les résines, qu'elles soient thermoplastiques ou thermodurcissables, présentent des caractéristiques mécaniques très variées selon leur nature chimique.

Voici les principales caractéristiques mécaniques que l'on évalue pour les résines représentées dans le Tableau (**Tableau I.1**) :

Tableau I.1 : Propriétés mécaniques des résines.

	<i>Polyester</i>	<i>Epoxyde</i>	<i>Phénolique</i>	<i>Polyamide</i>	<i>Aluminium</i>
<i>Déformation ϵ_r en traction (%)</i>	2 - 5	2 - 5	2,5	-	-
<i>Densité ρ (kg/Mat 3)</i>	1200	1100-1500	1200	1130	2630
<i>Contrainte σ_r en traction (MPa)</i>	50 - 80	60 - 80	40	70	358
<i>Module d'élasticité E en traction (GPa)</i>	2,8 - 3,5	3 - 5	-	3	69

I.3.2 Fibres

Les fibres ont pour rôle principal d'améliorer les propriétés mécaniques des composites, notamment la résistance à la traction et la rigidité. Ils sont généralement présents sous forme de fibres, organiques ou inorganiques, et représentent une fraction volumique comprise entre 30 % et 70 % du composite. Les renforts les plus couramment utilisés dans les matériaux composites (Figure. II.2) se présentent sous forme de fibres ou de leurs dérivés. Ils représentent généralement une fraction volumique comprise entre 0,3 et 0,7 du matériau composite.

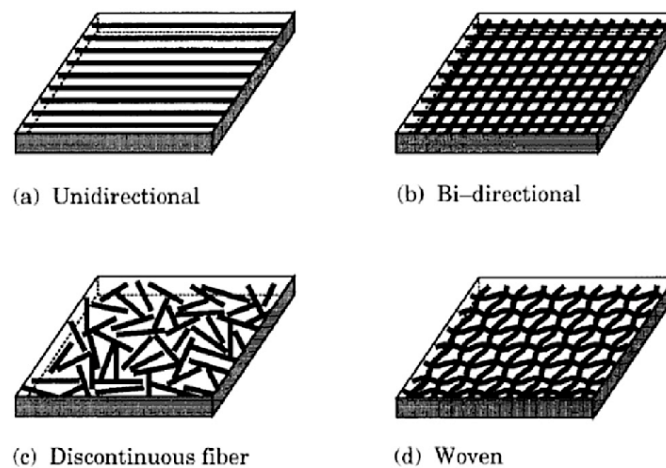


Figure.I.2 : Différents types de fibres

I.3.2.1 Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base

Voici le Tableau II.2 récapitulatif typique des principales caractéristiques mécaniques des fibres de base utilisées dans les matériaux composites (comme le verre, le carbone, l'aramide, etc.). Les valeurs peuvent varier selon les fournisseurs et les procédés, mais ce Tableau donne des ordres de grandeur représentatifs :

Tableau I.2 : Principales caractéristiques mécaniques des fibres [5]

Fibre	Densité (g/cm ³)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)
Verre E	2,55	70	2 000 – 3 500	2,5 – 4,8
Verre S	2,49	86	4 500 – 5 000	5 – 6
Carbone (standard modulus)	1,75 – 1,80	230 – 250	3 500 – 5 500	1,4 – 2,0
Aramide (Kevlar)	1,44	70 – 130	2 800 – 3 600	2,5 – 4
Polyéthylène à haut module	0,97	100 – 120	2 400 – 3 500	3 – 4
Basalte	2,70	85 – 90	2 800 – 4 800	3 – 4

I.3.3 Additifs

Les matériaux composites sont constitués d'une matrice (polymère, métal ou céramique) renforcée par des fibres (carbone, verre, aramide, etc.). Pour optimiser leurs performances, divers additifs (Figure. II.3) sont intégrés à la matrice afin d'améliorer des propriétés spécifiques telles que la résistance au feu, la durabilité, la conductivité, ou encore la Stabilité thermique. Les additifs sont des substances introduites en faibles quantités dans la matrice du composite (généralement polymère) dans le but de modifier ou d'améliorer certaines propriétés, qu'elles soient mécaniques, thermiques, chimiques ou esthétiques.

**Figure. I.3** : Additifs plastiques

1.3.3.1 Types d'additifs utilisés

Les différents types d'additifs sont

- **Additifs ignifugeants**

Utilisés pour améliorer la résistance au feu :

- **Additifs plastifiants**

Améliorent la flexibilité et la maniabilité de la matrice polymère :

- **Stabilité thermiques et UV**

Préservent les propriétés mécaniques et esthétiques des composites :

- **Antioxydants**

Protègent la matrice contre le vieillissement thermique ou oxydatif :

- **Agents de couplage**

Améliorent l'adhésion fibre-matrice :

- **Charges fonctionnelles**

Modifient la densité, la conductivité, ou la résistance mécanique :

1.4 Applications

Les matériaux composites occupent aujourd'hui une place centrale dans de nombreux secteurs industriels en raison de leurs propriétés exceptionnelles. Constitués de deux ou plusieurs composants aux caractéristiques physico-chimiques distinctes — généralement une matrice et un renfort — ils offrent une combinaison unique de légèreté, de résistance mécanique, de durabilité et de flexibilité de conception [6]. Ces avantages ont conduit à leur adoption croissante dans des domaines aussi variés que l'aéronautique, l'automobile, le bâtiment, le sport, l'énergie et même le biomédical.

L'utilisation des composites permet non seulement d'alléger les structures, mais aussi d'améliorer leur performance tout en réduisant les coûts d'entretien et en prolongeant leur durée de vie. À l'heure où les exigences en matière de performance, d'efficacité énergétique et de développement

durable se font de plus en plus pressantes, les matériaux composites apparaissent comme une solution technologique incontournable.

Les matériaux composites sont utilisés dans de nombreux secteurs pour leurs propriétés exceptionnelles : légèreté, résistance mécanique, résistance à la corrosion, isolation thermique, etc.

Voici un aperçu des principales applications des matériaux composites selon les domaines:

a- Aéronautique et aérospatial

- Avions (fuselage, ailes, gouvernes) – Ex : Boeing 787 utilise ~50 % de composites.
- Satellites et lanceurs spatiaux – Pour alléger les structures tout en garantissant leur rigidité.
- Drones – Pour combiner légèreté et résistance.

b- Automobile et transport

- Pièces de carrosserie (capots, pare-chocs, portières) – En fibre de verre ou carbone.
- Composants structurels (châssis, suspensions) – Utilisation croissante pour réduire le poids et la consommation de carburant.
- Matériel ferroviaire – Coques extérieures, sièges, parois.

c- Nautisme

- Coques de bateaux, mâts, planchers – En fibre de verre, carbone ou Kevlar.

d- Résistance à la corrosion et à l'eau de mer.

e- Bâtiment et construction

- Renforcement de structures (ponts, bâtiments) – Composites à matrice polymère renforcés de fibres de carbone.
- Façades, toitures, panneaux sandwich – Légers et isolants.

f- Mobilier urbain, structures temporaires ou modulaires.

- Industrie et équipements
- Tuyauteries, réservoirs – Résistance chimique élevée.
- Outillages industriels, moules, gabarits.

g- Énergie

- Éoliennes – Pales en composites pour leur légèreté et résistance.
- Panneaux isolants dans les centrales ou réseaux.
- Réservoirs de stockage d'hydrogène ou gaz.

h- Médical

- Prothèses, orthèses, fauteuils roulants – Légers et personnalisables.
- Instruments médicaux, structures d'imagerie (ex. IRM).

i- Sports et loisirs

- Raquettes, clubs de golf, skis, vélos, skateboards – Pour performance et légèreté.
- Casques, protections, planches de surf.

1.5 Conclusion

Les matériaux composites représentent une avancée majeure dans le domaine des matériaux de construction et de fabrication. En combinant les propriétés de deux ou plusieurs composants distincts, ils permettent d'obtenir des matériaux aux performances supérieures, notamment en termes de légèreté, de résistance mécanique, de durabilité et parfois même de résistance à la corrosion. Utilisés dans des secteurs variés tels que l'aéronautique, l'automobile, le bâtiment ou encore les sports, les composites offrent des solutions techniques innovantes et adaptées aux exigences modernes. Leur développement continu et les recherches en cours laissent entrevoir de nouvelles applications toujours plus performantes et durables.

Les additifs jouent un rôle essentiel dans la formulation des matériaux composites en permettant d'améliorer ou de modifier leurs propriétés selon les besoins spécifiques des applications.

Dans le cadre de notre travail, nous avons utilisé le liège comme additif dans une matrice de plastique de type polypropylène (PP).

L'objectif principal est d'explorer les effets de l'incorporation du liège sur les propriétés mécaniques et environnementales du composite obtenu.

Chapitre II

Recyclage

Chapitre II : Recyclage

II.1 Introduction

Le plastique est devenu un matériau omniprésent dans notre vie quotidienne, utilisé dans de nombreux domaines tels que l'emballage, la construction, l'automobile ou encore l'électronique. Sa légèreté, sa résistance et son faible coût en font un matériau prisé, mais aussi une source majeure de pollution. Chaque année, des millions de tonnes de déchets plastiques sont produits dans le monde, mettant en danger les écosystèmes, notamment marins, et contribuant au changement climatique. Face à cette problématique environnementale croissante, le recyclage des plastiques apparaît comme une solution essentielle pour limiter les impacts négatifs de cette matière sur notre planète. Mais en quoi consiste réellement le recyclage des plastiques ? Quels sont ses avantages, ses limites et les défis qu'il soulève ? Cette étude se propose d'explorer les différentes facettes du recyclage plastique, de ses procédés techniques aux enjeux environnementaux et économiques qu'il implique [7].

II.2 Déchets plastiques

Après usage, les objets en plastique deviennent des déchets que les utilisateurs cherchent à éliminer. Certains plastiques, comme les emballages, se transforment rapidement en déchets, tandis que d'autres, tels que les meubles, pièces d'automobiles ou d'électroménagers, et matériaux de construction en plastique, mettent plusieurs années à devenir des déchets. Selon leur historique, ces déchets plastiques peuvent être plus ou moins détériorés et sales (**Figure. III.1**).

L'altération correspond à une modification chimique des polymères, causée par le vieillissement naturel, mais aussi par des facteurs comme l'oxydation, la chaleur ou l'exposition à la lumière. La salissure des déchets peut provenir de deux sources :

Salissure propre aux déchets : il s'agit des résidus encore présents dans les déchets eux-mêmes, comme des restes de shampoing dans un flacon ou des traces dans un pot de margarine.

Salissure externe : ce sont les impuretés accumulées avant la collecte, par exemple lorsque les déchets sont mélangés avec d'autres ou ont été en contact avec le sol.










Figure III.1 Déchets plastiques d'une décharge

II.2.1 Types de plastiques recyclables

La production intensive de plastique, combinée à une gestion inefficace de ses déchets, représente un enjeu environnemental majeur. Dans ce contexte, le recyclage des plastiques apparaît comme une solution incontournable pour réduire la pollution et préserver les ressources naturelles. Mais tous les plastiques ne se recyclent pas de la même manière, et certains ne sont même pas recyclables. Cette diversité rend nécessaire une meilleure connaissance des différents types de plastiques recyclables montrés dans le [Tableau II.1](#), de leurs caractéristiques et des méthodes de traitement adaptées à chacun.

Tableau II.1 : Plastiques recyclables [6]

Code	Type de plastique	Recyclable	Utilisations courantes
	PET (Polyéthylène téréphtalate)	Oui	Bouteilles d'eau, emballages alimentaires
	PEHD (Polyéthylène haute densité)	Oui	Flacons de lessive, bouchons
	PVC (Polychlorure de vinyle)	Difficile	Tuyaux, cartes bancaires
	PELD (Polyéthylène basse densité)	Parfois	Sacs plastiques, films
	PP (Polypropylène)	Oui	Pots de yaourt, pailles
	PS (Polystyrène)	Difficile	Barquettes, gobelets
	Autres	Rarement	Plastiques techniques, mélangés

II.3 Types de déchets plastiques

Selon la dispersion géographique, le degré de souillure et l'hétérogénéité, il est possible de distinguer quatre sources de déchets plastiques : les déchets de l'industrie, les déchets commerciaux, les déchets agricoles et les déchets municipaux.

- **Déchets industriels**

On appelle « déchets industriels » les déchets générés par les entreprises qui transforment les matières plastiques, ainsi que les rebuts issus de l'utilisation de ces plastiques dans des secteurs comme l'emballage ou la construction. Ces déchets n'ont pas encore été intégrés dans le cycle de consommation (Figure. II.2).

Les entreprises de transformation plastique produisent différents types de déchets internes, parmi lesquels :

Les purges : ce sont de gros blocs de plusieurs kilos, résultant de la vidange des machines d'injection ou d'extrusion. Ces opérations ont lieu lors des arrêts de production, des entretiens, ou encore lors de changements de moules, de filières ou de couleurs. Ces purges ne sont pas toujours de qualité optimale car elles peuvent contenir des lubrifiants en quantité.

Les pièces défectueuses : ce sont des pièces non conformes qui ne peuvent pas être commercialisées.

L'ensemble de ces résidus peut représenter jusqu'à 10 % de la production.



Figure. II.2 : Déchets industriels

- **Déchets commerciaux**

Les déchets commerciaux proviennent des commerces et des ateliers. En réalisant un inventaire de ces établissements, on peut déterminer les types de déchets plastiques qu'ils produisent. Cela permet ensuite de mettre en place un système de collecte sélective directement dans ces structures.

On peut distinguer deux types de déchets commerciaux :

- **Déchets (Mélange / peu souillés)** : Grand magasins (emballages), Entrepreneurs (tuyaux, films, ...) , Plombiers (tuyaux PVC)
- **Déchets (Mélange / souillés)** : Hôtels (contenants,), restaurants, stations-services, garages, coiffeur, hôpitaux, pharmacies

- **Déchets agricoles**

Les secteurs agricole et forestier utilisent également une quantité significative de plastiques, que ce soit pour des besoins de construction (tuyaux d'irrigation, tuteurs, bâches, etc.) ou de conditionnement (jerrycans, sacs à grains, films plastiques, etc.). Bien que ces sources soient souvent situées dans des zones plus éloignées, elles ne doivent pas être négligées. Avec une sensibilisation adéquate, les agriculteurs peuvent être incités à stocker leurs déchets plastiques, permettant ainsi une collecte organisée une à deux fois par an ([Figure. III.3](#)).



Figure. II.3 : Déchets agricoles

- ***Déchets municipaux***

Les déchets plastiques provenant des ordures ménagères représentent généralement la principale source de plastiques à traiter (Figure II.4). Ce volume est étroitement lié au niveau de consommation de la population concernée, pour deux raisons principales :

- Un individu peut produire jusqu'à 1 kg de déchets par jour si son pouvoir d'achat est élevé, contre moins de 0,5 kg par jour pour une personne à faibles revenus ;
- La part des plastiques dans ces déchets varie également selon le niveau de vie, représentant entre 3 % et 8 % de leur poids total.

Ainsi, la production annuelle de déchets plastiques par habitant peut fluctuer entre 5 kg et 25 kg. Ces déchets sont généralement très hétérogènes, fortement souillés et largement dispersés, avec une prédominance d'emballages tels que des films plastiques, des sachets et des flacons.

Malgré leur dispersion, leur production reste constante. La récupération des plastiques issus des déchets municipaux peut s'effectuer :

- Directement au domicile des habitants (déchets les moins souillés),
- Dans les rues et les espaces publics (déchets très souillés),
- Dans les centres de tri (déchets très souillés),
- Ou encore dans les décharges publiques (déchets très souillés).



Figure. II.4 : déchets municipaux

II.4 Élimination des déchets plastiques

L'élimination des déchets plastiques est un enjeu majeur pour la protection de l'environnement, la santé humaine et la biodiversité.

Voici un aperçu des principales méthodes, défis et solutions associées [8]:

II.4.1 Méthodes d'élimination des déchets plastiques

Les déchets plastiques représentent aujourd'hui un enjeu environnemental majeur à l'échelle mondiale. Leur accumulation dans les océans, les sols et les espaces urbains menace la biodiversité, la santé humaine et la qualité de vie. En raison de leur résistance à la dégradation naturelle, les plastiques persistent pendant des centaines d'années, posant des défis importants pour leur gestion et leur élimination [9]. Face à cette problématique, plusieurs méthodes d'élimination ont été développées, visant à réduire l'impact des déchets plastiques sur l'environnement. Ces méthodes incluent l'incinération, la valorisation énergétique, ainsi que des solutions plus récentes comme la biodégradation ou les techniques de dépollution innovantes. Mais ses méthodes présentent beaucoup d'inconvénients :

Voici les principaux inconvénients liés à l'élimination des déchets plastiques, selon les méthodes utilisées :

a- Pollution environnementale

Les plastiques non biodégradables peuvent rester dans l'environnement pendant des centaines d'années, polluant les sols, les rivières et les océans.

b- Impact sur la faune

Les animaux marins et terrestres peuvent ingérer des microplastiques ou des morceaux plus gros, ce qui peut provoquer des blessures, des blocages digestifs, voire la mort.

c- Émission de gaz toxiques

L'incinération des déchets plastiques peut libérer des substances toxiques (dioxines, furannes) qui polluent l'air et présentent des risques pour la santé humaine.

d- Difficulté de recyclage

Tous les plastiques ne sont pas facilement recyclables, et le tri peut être coûteux et complexe, ce qui entraîne souvent l'enfouissement ou l'incinération.

e- Consommation d'énergie et ressources

La production et le traitement des déchets plastiques nécessitent beaucoup d'énergie et de ressources, ce qui contribue aux émissions de gaz à effet de serre.

f- Enfouissement problématique

Les décharges peuvent contaminer les nappes phréatiques et occuper beaucoup d'espace, en plus de ne pas résoudre le problème à long terme.

Le recyclage est un procédé efficace qui consiste à transformer les déchets afin de leur donner une nouvelle vie. Plutôt que de simplement jeter les matériaux usagés, le recyclage permet de les réutiliser en les convertissant en nouvelles matières premières. Ce processus contribue à réduire la consommation de ressources naturelles, à diminuer la pollution et à limiter la production de déchets. Grâce au recyclage, on peut par exemple récupérer le plastique, le liège, le papier ou le métal pour fabriquer de nouveaux matériaux, ce qui participe à la préservation de l'environnement et à une gestion plus durable des ressources.

Comprendre ces différentes approches est essentiel pour envisager une gestion durable des plastiques et limiter leur empreinte écologique.

II.4.1.1 Recyclage

- Recyclage mécanique : broyage, nettoyage, refonte en nouveaux produits.
- Recyclage chimique : décomposition des plastiques en monomères ou carburants.
- Limites : faible taux de recyclage mondial (~9 %), tri complexe, contamination des matériaux.

II.5 Recyclage des déchets plastiques

Le plastique s'est imposé comme un matériau incontournable de notre quotidien, présent dans des secteurs variés tels que l'emballage, le bâtiment, l'automobile ou l'électronique. Apprécié pour sa légèreté, sa durabilité et son faible coût, il constitue toutefois une source importante de pollution. Chaque année, des millions de tonnes de déchets plastiques sont produits dans le monde, mettant en danger les écosystèmes, notamment marins, et contribuant au changement climatique. Face à cette problématique environnementale croissante, le recyclage des plastiques apparaît comme une solution essentielle pour limiter les impacts négatifs de cette matière sur notre planète.

II.5.1 Définition

Le recyclage du plastique consiste à transformer les déchets plastiques en matériaux réutilisables. Ce processus comprend plusieurs étapes : la collecte des plastiques, leur tri en fonction des types de polymères, puis leur fusion pour produire des granulés. Ces granulés servent ensuite à fabriquer divers objets, comme des gobelets, des chaises, des Tableauleaues ou encore des sacs en polyéthylène. Le recyclage des plastiques a débuté dans les années 1970 et reste fortement encouragé afin de préserver l'environnement. Ci-dessous sont présentés les types de plastiques pouvant être recyclés. [10]

II.5.2 Étapes du recyclage mécanique des plastiques

Le recyclage mécanique est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour valoriser les déchets plastiques. Il consiste à transformer mécaniquement les déchets plastiques post consommation ou postindustriels en de nouveaux produits. Voici les principales étapes du processus :

a- Collecte des déchets plastiques

Cette étape consiste à rassembler les déchets plastiques provenant de diverses sources : ménages, industries, commerces, décharges ou centres de tri (Figure. II.5).



Figure. II.5 : Collecte des déchets plastiques

b- Tri des plastiques

Les plastiques sont triés en fonction de leur type (PE, PP, PET, etc.), couleur, forme et parfois de leur usage. Le tri peut être (Figure. II.6) :

- Manuel.
- Automatique : utilisant des capteurs infrarouges, des lecteurs optiques, ou des systèmes de flottation (densité).



Figure. II.6 : Tri des déchets plastiques (a) : Manuel, (b) : Machine de tri

c- Broyage

Les plastiques triés sont broyés en petits morceaux appelés paillettes ou flakes, facilitant les étapes suivantes (Figure. II.7).



Figure. II.7 : Broyage des déchets plastiques

d- Lavage

Les paillettes plastiques sont lavées pour éliminer les impuretés (Figure. II.8) : colle, étiquettes, résidus alimentaires ou chimiques. Ce lavage peut être :

À chaud (avec détergent)

- Par friction
- Par flottation



Figure. II.8 : Lavage des paillettes plastiques

e- Séchage

Après le lavage, les plastiques sont séchés pour éviter l'humidité, qui pourrait nuire à la qualité du produit final (Figure. II.9).



Figure. II.9: Sécheur thermique et mécanique pour tous plastiques

II.6 Recyclage de liège

Le chêne-liège (*Quercus suber* L.) est une essence forestière noble et remarquable, reconnue pour sa capacité unique à produire une écorce subéreuse, le liège, à la fois précieuse et renouvelable. Ce matériau se caractérise par sa légèreté, sa souplesse et son élasticité. L'aire de répartition de cette espèce est limitée à une zone géographique restreinte, principalement concentrée autour du bassin méditerranéen occidental et le littoral atlantique du sud de l'Europe [10]. On le trouve uniquement dans six pays : le Portugal, l'Espagne, l'Italie, la France, l'Algérie et la Tunisie, sur une superficie totale avoisinant les deux millions d'hectares.

D'après AMORIM CORK COMPOSITES [11] (2012), l'Algérie occupe le troisième rang mondial en termes de surface (Figure. III.10), représentant 18 % de l'ensemble.



Figure. III.10 : Répartition du chêne liège en Algérie

Aujourd'hui, le liège dépasse le simple statut de matériau : ses nombreuses propriétés sont exploitées dans diverses industries, allant des technologies de pointe à la pharmacie, en passant par l'aéronautique et l'automobile. Moderne et performant, le liège est utilisé pour un nombre croissant d'applications.

Dans un contexte de transition écologique et de lutte contre la pollution, le développement de matériaux innovants et durables constitue un enjeu majeur pour de nombreux secteurs industriels. Parmi les pistes les plus prometteuses Figure la valorisation des déchets, qu'ils soient d'origine végétale ou plastique, en vue de créer des matériaux composites aux propriétés mécaniques, thermiques et environnementales intéressantes.

Le liège se distingue par sa légèreté, sa résilience, ses capacités d'isolation et sa biodégradabilité. En parallèle, les déchets plastiques représentent une problématique environnementale de grande ampleur, mais également une ressource potentielle lorsqu'ils sont correctement recyclés et intégrés dans une nouvelle chaîne de valeur.

Ce projet s'inscrit dans cette logique d'économie circulaire en explorant la création d'un matériau composite associant liège et plastiques recyclés. L'objectif est de concevoir un matériau hybride, performant et respectueux de l'environnement.

II.7 Conclusion

Le recyclage est aujourd'hui un enjeu environnemental majeur. En permettant de réduire la quantité de déchets, de préserver les ressources naturelles et de limiter la pollution, il constitue un geste simple mais essentiel pour protéger notre planète. Cependant, pour qu'il soit réellement

efficace, il doit être accompagné d'une prise de conscience collective, d'une meilleure éducation au tri et d'initiatives concrètes de la part des citoyens, des entreprises et des gouvernements. Recycler, c'est donc bien plus qu'un acte quotidien : c'est un engagement pour un avenir plus durable.

Chapitre III

Matériaux et méthodes

Chapitre III : Matériaux et méthodes

III.1 Introduction

Dans un contexte mondial de transition vers une économie circulaire et de réduction de l'impact environnemental des matériaux, le développement de nouveaux composites issus de ressources renouvelables et de déchets recyclés représente une voie prometteuse. Le liège, matériau naturel, renouvelable et biodégradable, possède des propriétés physiques intéressantes telles que la légèreté, l'élasticité, la résistance à l'humidité et aux agents chimiques, ce qui en fait un excellent candidat pour la fabrication de composites durables.

Parallèlement, les déchets plastiques constituent un enjeu majeur de pollution, notamment en raison de leur durabilité et de leur difficulté à se dégrader naturellement. Leur valorisation sous forme de matériaux composites permet non seulement de limiter leur impact environnemental, mais aussi de leur donner une seconde vie utile.

Ce travail vise à élaborer un nouveau matériau composite en associant le liège à des déchets plastiques en polypropylène (PP).

III.2 Déchets plastiques polypropylène pp

Le polypropylène (PP) (Figure IV.1) utilisé dans cette étude provient d'une startup innovante spécialisée dans le recyclage des déchets plastiques.



Figure. III.1 : Polypropylène (PP)

Ce matériau recyclé s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire visant à réduire l'impact environnemental des plastiques en leur offrant une seconde vie. La qualité du PP recyclé fourni par cette entreprise en fait un candidat pertinent pour diverses applications industrielles, tout en répondant aux enjeux actuels de durabilité.

III.3 Liège

Le liège que nous avons utilisé est fourni grâce à une collecte soigneusement réalisée dans les forêts de Jijel, en Algérie, (Figure. IV.2). Cette région, riche en chênes-lièges, offre un environnement propice à la croissance de ce matériau naturel, durable et écologique. La récolte du liège y est effectuée de manière traditionnelle, respectueuse de l'arbre, permettant ainsi de préserver la biodiversité locale tout en valorisant les ressources naturelles de la région. Grâce à cette collecte locale, nous bénéficions d'un liège de qualité, authentique et renouvelable, contribuant à la promotion d'un développement durable et à la valorisation du patrimoine naturel algérien.



Figure. III.2 : Liège fourni par la collecte se fait dans les forêts de Jijel, en Algérie

III.3.1 Préparation de liège

Le liège a été broyé dans le cadre des activités menées par la startup de recyclage des déchets de l'Université de M'sila. Cette initiative s'inscrit dans une démarche écologique visant à valoriser les déchets organiques, en particulier le liège, afin de promouvoir le recyclage et le développement durable (Figure. IV.3).

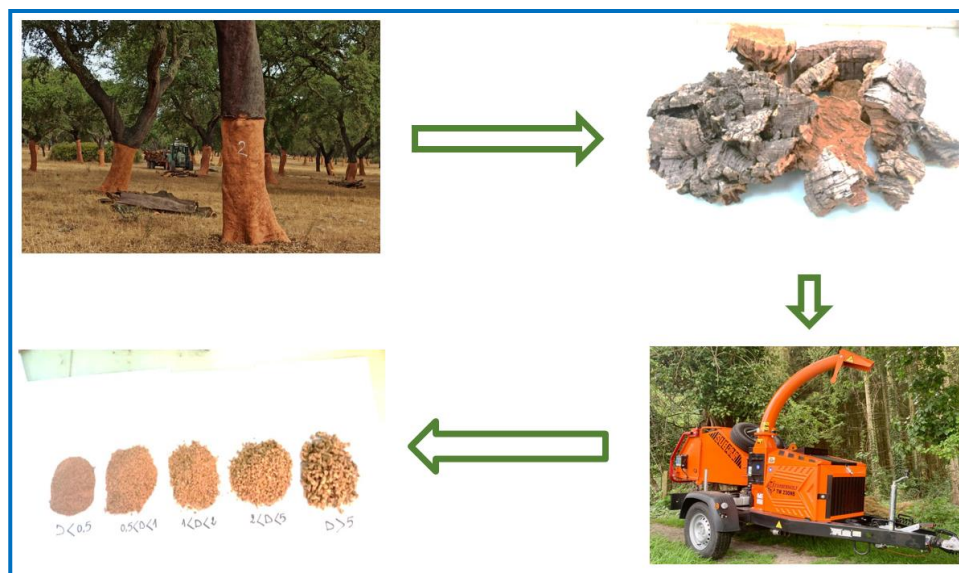


Figure. III.3 : Liège broyé par la startup de recyclage des déchets de l'Université de M'sila.

III.3.2 Caractérisations du liège

Pour exploiter pleinement le potentiel du liège et optimiser ses performances dans des applications industrielles, il est essentiel de bien comprendre sa composition chimique et son comportement thermique. À cette fin, des techniques analytiques telles que la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et l'analyse thermogravimétrique (ATG) sont couramment utilisées [12].

III.3.2.1 ATR – FTIR (Attenuated Total Reflectance)

La spectroscopie ATR-FTIR permet d'identifier les groupes fonctionnels présents dans le liège en analysant les vibrations moléculaires caractéristiques des différents composants chimiques (subérine, lignine, cellulose, etc.). Quant à l'analyse thermogravimétrique, elle fournit des informations précieuses sur la stabilité thermique du matériau, la perte de masse en fonction de la température, ainsi que sur les différentes étapes de dégradation thermique.

L'objectif de ce travail est donc de caractériser le liège à l'aide des techniques ATR-FTIR et ATG, afin d'en mieux comprendre la structure chimique et le comportement thermique. Cette étude permettra de mettre en évidence les composants majeurs du liège et les

phénomènes thermiques qui les affectent, apportant ainsi des données utiles pour son utilisation dans des applications spécifiques.

L'opération ATR-FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, ou spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier) appliquée au **liège** est une méthode analytique utilisée pour étudier la composition chimique de ce matériau naturel.

La [Figureure III.4](#) présente le résultat de traitement par ATR-FTIR

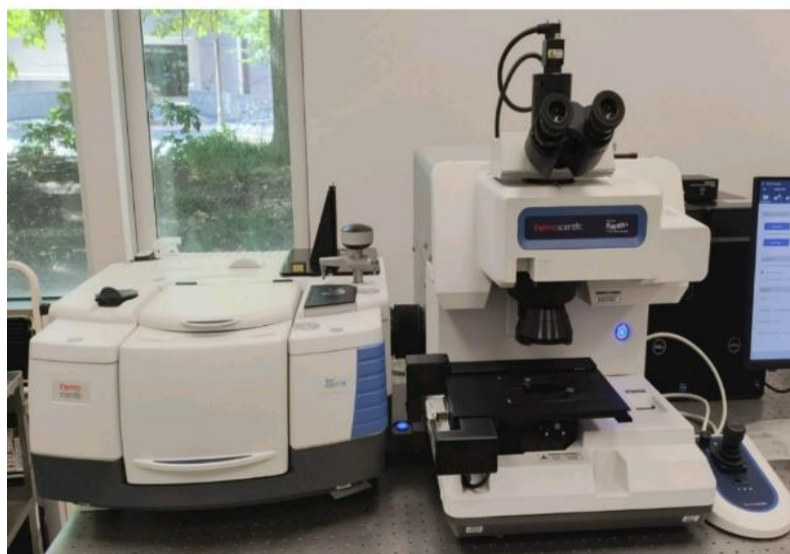


Figure. III.4 : ATR-FTIR

III.3.2.1 ATR - FTIR

L'analyse thermogravimétrique (ATG) du liège est une méthode analytique permettant d'étudier sa **Stabilité thermique** et sa **composition chimique** en fonction de la perte de masse lorsqu'il est soumis à une montée en température contrôlée.

La [Figure III.5](#) montre le dispositif pour l'analyse ATG.

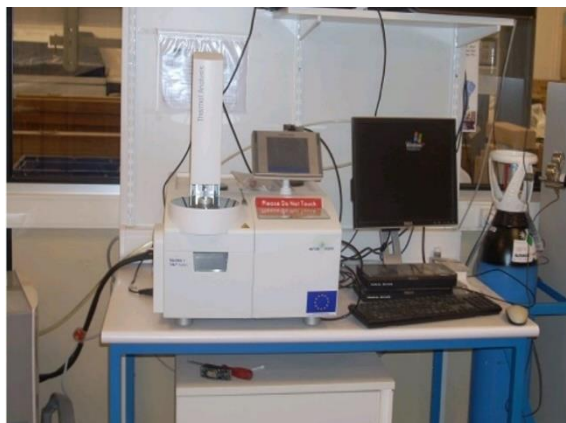


Figure. III.5 : ATG

III.4 Elaboration des constituants

Le processus de mélange de granulés de liège avec du plastique (PP) dans une extrudeuse est une opération courante dans la fabrication de composites thermoplastiques à base de liège.

Les granulés de liège et de plastique (PP) sont pesés et dosés selon la formulation désirée, typiquement (Tableau III.1) :

Tableau. III.1 : Proportions des constituants dans le nouveau matériau

N	Liège [%]	Plastique (PP) [%]	Désignation
1	25%	75%	Mat 1
2	35%	65%	Mat 2
3	45%	55%	Mat 3

Ils sont ensuite introduits dans une trémie d'alimentation en vrac (mélange préalable). L'extrudeuse chauffe, malaxe et transporte le mélange à travers plusieurs zones :

- a- Zone d'alimentation : Introduction des matières sèches.
- b- Zone de compression : Augmentation de la pression, début du chauffage du plastique.
- c- Zone de mélange :
 - Le plastique fond sous l'effet de la chaleur (généralement 160–220 °C selon le polymère).

- Le liège est mélangé mécaniquement avec le polymère fondu.
- Des éléments de vis spécifiques favorisent la dispersion homogène des particules de liège.
- d- Zone de dosage/pompage : Homogénéisation finale et régulation du débit vers la filière.

Le mélange fondu sort par une **filière** pour former un profilé, un film, ou des granulés, produit extrudé est ensuite **refroidi** (par air ou eau) pour solidifier le matériau.

La Figure III.6 présente le processus d'élaboration de nouveau matériau composite.

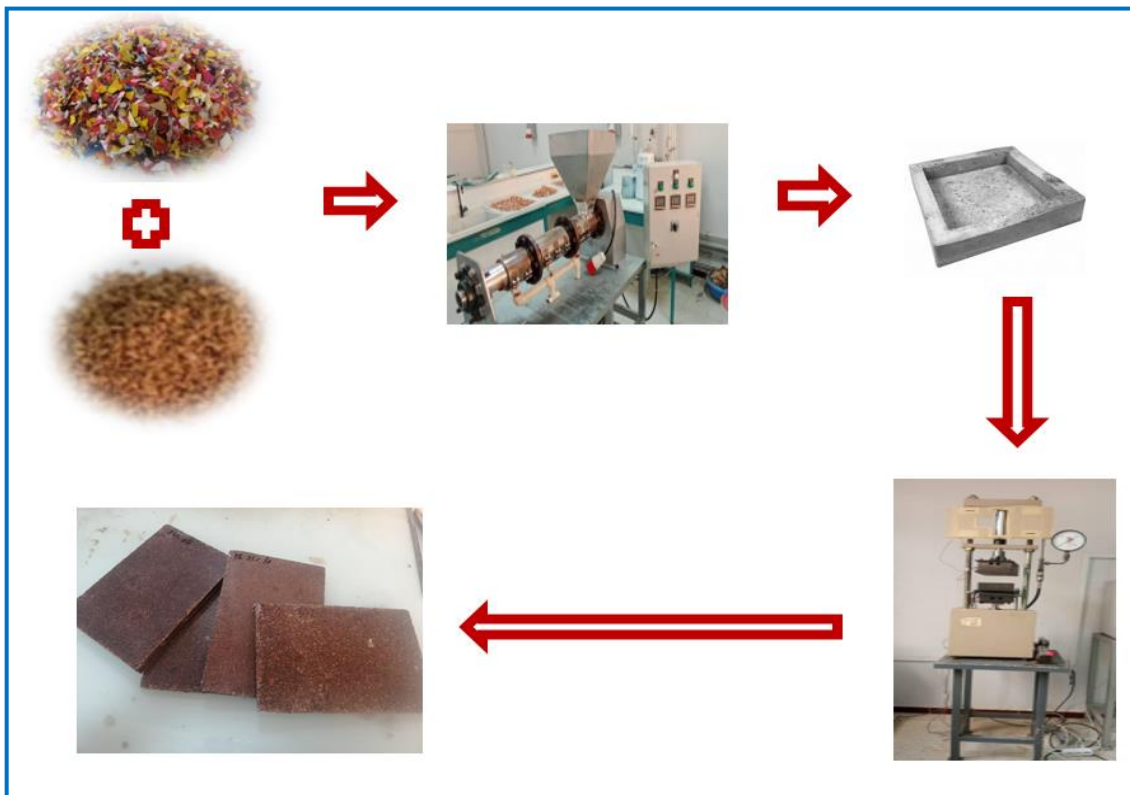


Figure. III.6 : Processus d'élaboration de nouveau matériau composite

III.4 Découpage

Dans le cadre de l'étude des propriétés mécaniques des matériaux, des essais tels que la traction et la flexion sont couramment utilisés pour évaluer la résistance, l'élasticité et la ductilité des échantillons. Afin de garantir la fiabilité et la reproductibilité des résultats obtenus, il est essentiel de préparer les échantillons avec rigueur selon des normes spécifiques. La première étape de cette préparation consiste à découper les échantillons à partir de la matière brute, en respectant des dimensions et des formes précises adaptées à chaque type d'essai [13].

Le processus de découpe commence par le choix du matériau à tester, qui peut être sous forme de plaques, barres ou autres semi-produits. Selon les normes en vigueur (comme ISO ou ASTM), les dimensions des échantillons sont définies pour chaque essai (Figure. IV.12).

- Pour les essais de traction, les échantillons sont généralement découpés en forme d'éprouvettes à section rectangulaire ou en "os de chien", avec une zone de striction centrale permettant une localisation de la rupture.
- Pour les essais de flexion, les échantillons sont découpés sous forme de barres parallélépipédiques de dimensions normalisées. L'objectif est d'obtenir des surfaces planes et régulières afin de garantir une bonne répartition des contraintes lors de l'application de la charge.



Figure. III 7 : Découpage des plaques

III.5 Essais mécaniques

Les essais mécaniques jouent un rôle fondamental dans l'évaluation des propriétés physiques et mécaniques des matériaux. Ils permettent de déterminer la résistance, la ductilité, la dureté, la ténacité et d'autres caractéristiques essentielles qui influencent le comportement des matériaux sous différentes sollicitations.

III.5.1 Essai de traction

L'essai de traction constitue l'un des tests mécaniques (Figure. IV.7) les plus fondamentaux et les plus utilisés pour évaluer le comportement des matériaux sous une charge uniaxiale. Il permet de déterminer des caractéristiques clés telles que le module d'élasticité, la limite d'élasticité, la résistance ultime et l'allongement à la rupture. Pour réaliser cet essai, une éprouvette de forme et de dimensions normalisées est prélevée dans le matériau composite à tester (Figure. IV.8).

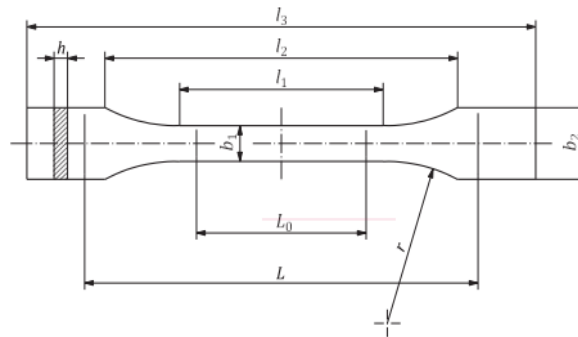


Figure. III.8 : Eprouvette de traction selon la norme ISO527-4

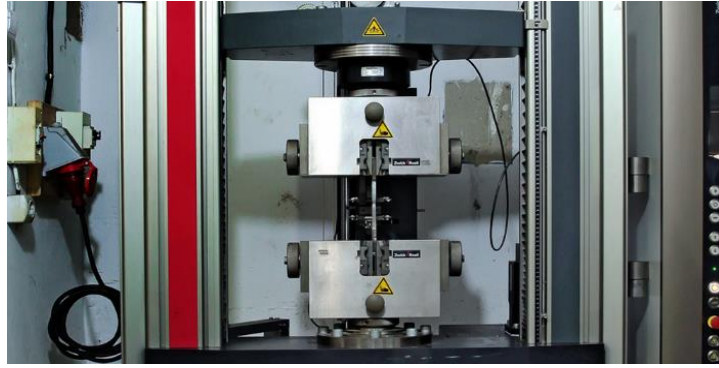


Figure. III.8 : Banc d'essai de traction

III.5.1 Essai de flexion

L'essai de flexion (Figure. IV.9) est une méthode couramment utilisée en mécanique des matériaux pour évaluer le comportement d'un matériau lorsqu'il est soumis à une contrainte de flexion. Cet essai permet de déterminer plusieurs propriétés mécaniques essentielles telles que la résistance à la flexion, le module d'élasticité en flexion et la déformation à la rupture [14].



Figure. III.9 : Banc d'essai de flexion

L'éprouvette utilisée pour cet essai est généralement une barre ou une plaque de dimensions normalisées (Figure. III.9), conçue de manière à garantir une répartition homogène des contraintes pendant l'essai.

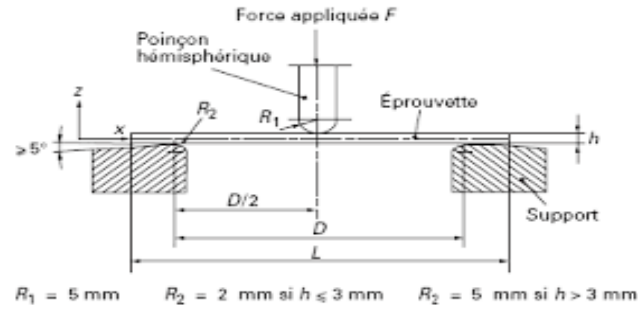


Figure. III.10 : Epreuve de flexion selon la norme ISO178 :2003

En appliquant une charge sur l'éprouvette selon un schéma bien défini (généralement en appui simple ou en trois points), il est possible d'analyser la réponse du matériau jusqu'à la rupture ou la déformation plastique.

III.6. Paramètres étudiés

a- Epreuve de traction

Voici les caractéristiques mécaniques identifiées grâce à l'essai de traction

- Contrainte de rupture

La contrainte à la rupture est déterminée par la relation suivante [19] :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Avec :

F : Force de traction (N)

S : Section rompue (mm²)

σ : Contrainte de la rupture (MPa)

- Module d'Young [19] :

Le module d'Young représente le coefficient de proportionnalité entre la contrainte σ et la déformation ε .

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{FL_0}{S\Delta L} \quad (3)$$

Avec :

E : Module d'Young (MPa).

L₀ : Distance entre mors (mm).

S : Surface ou section (mm²).

ε : La déformation de la longueur des éprouvettes.

ΔL : L'allongement des éprouvettes (mm).

b- Eprouvette de flexion

Cet essai a pour but d'évaluer les propriétés mécaniques en flexion des matériaux analysés, notamment la contrainte à la rupture (**σ_F**), le module de flexion (**E_F**) et la déformation à la rupture (**ε_F**).

La contrainte de flexion se détermine à l'aide de la formule suivante :

$$\boldsymbol{\sigma}_F = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (3)$$

Où :

F : effort de flexion

L : longueur entre appuis

b : largeur de l'éprouvette

h : épaisseur de l'éprouvette

Pour obtenir le module de flexion, on applique la formule suivante

$$\sigma_F = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (3)$$

$$E_F = \frac{L^3}{4bh^2} \quad (4)$$

$$m = \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad (5)$$

m : La pente de la partie linéaire de la courbe charge déplacement.

f : est le déplacement en mm

III.7 Conclusion

L'objectif est de tirer parti des qualités intrinsèques de ces deux composants pour obtenir un matériau présentant de bonnes performances mécaniques, une durabilité accrue, et un impact environnemental réduit. Ce composite pourrait trouver des applications dans divers secteurs tels que le bâtiment, l'automobile ou le design, en tant qu'alternative écologique et innovante aux matériaux conventionnels.

Chapitre IV

Résultats & discussions

Chapitre IV. Résultats et discussion

IV. Introduction

Cette section présente les principaux résultats obtenus au cours de l'étude et propose une analyse critique de leur signification. Les données expérimentales sont tout d'abord exposées de manière claire et structurée, accompagnées de Figures, Tableaux ou graphiques lorsque cela est pertinent.

Les matériaux testés dans ce chapitre sont codés comme indiqué dans le Tableau IV.1 du chapitre III:

IV.1 Analyse structurale ATR - FTIR

La Figure IV.1 fournie représente un spectre ATR-FTIR (Attenuated Total Reflectance – Fourier Transform Infrared Spectroscopy) du liège.

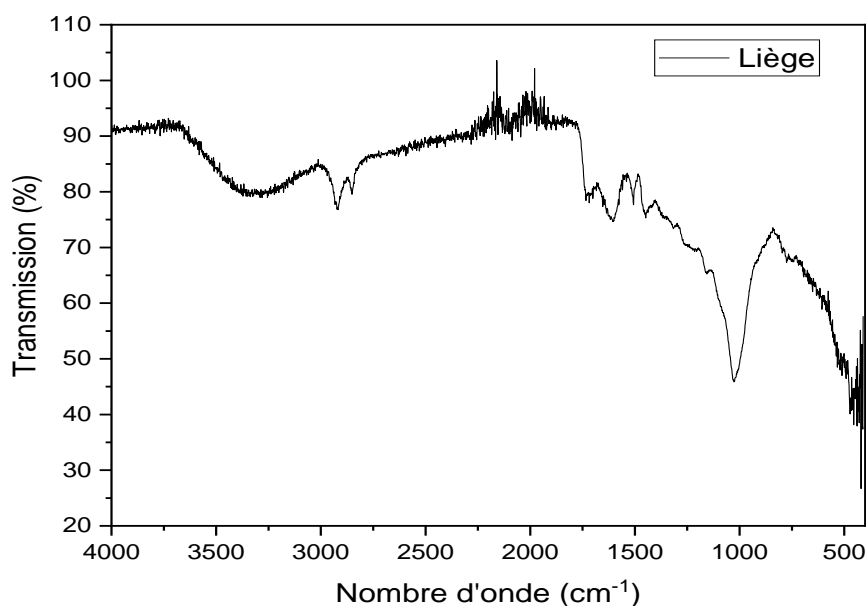


Figure.IV.1 : Spectres ATR-FTIR de liège utilisé

Voici une analyse générale du spectre infrarouge typique du liège, en identifiant les principales bandes d'absorption visibles :

1- Zone 3700–3000 cm⁻¹ (liaisons O–H et N–H)

- Large bande autour de 3300–3400 cm⁻¹ :
- Cela correspond à l'élongation des liaisons O–H (hydroxyles), typiques de l'humidité, des groupes hydroxyles dans les alcools, phénols, et acides carboxyliques.
- Lié à la lignine et aux polysaccharides présents dans le liège.

2- Zone 3000–2800 cm⁻¹ (liaisons C–H)

- Deux bandes nettes à 2920 cm⁻¹ et 2850 cm⁻¹ :
- Vibrations d'élongation C–H des groupes méthyle (CH₃) et méthylène (CH₂).
- Indiquent la présence de chaînes aliphatiques longues, caractéristiques de la subérine, un constituant majeur du liège.

3- Zone 1750–1650 cm⁻¹ (liaisons C=O)

- Pic autour de 1730 cm⁻¹ :
- Bande d'élongation du groupement carbonyle C=O des esters, acides carboxyliques ou aldéhydes.
- Représente les esters de la subérine et/ou les acides gras.

4- Zone 1600–1500 cm⁻¹

- Bandes à 1600 cm⁻¹ et 1510 cm⁻¹ :
- Correspondent aux vibrations des liaisons C=C aromatiques, notamment dans la lignine.

5- Zone 1300–1000 cm⁻¹

- Multiples pics dans cette région :
- Liés aux vibrations de liaisons C–O, C–C, C–O–C, caractéristiques des polysaccharides (cellulose, hémicellulose) et esters.
- Pic vers 1025–1050 cm⁻¹ souvent attribué aux groupes C–O des alcools primaires et secondaires.

6- Zone en dessous de 900 cm⁻¹

- Bandes complexes souvent attribuées à des déformations hors du plan des cycles aromatiques ou à des vibrations spécifiques de squelette moléculaire.

V.2 Analyse thermogravimétrique (ATG)

La courbe ATG de Liège de la Figure IV.2 fournie représente probablement une analyse thermique gravimétrique (ATG ou TGA en anglais) mesurant la perte de masse d'un échantillon en fonction de la température

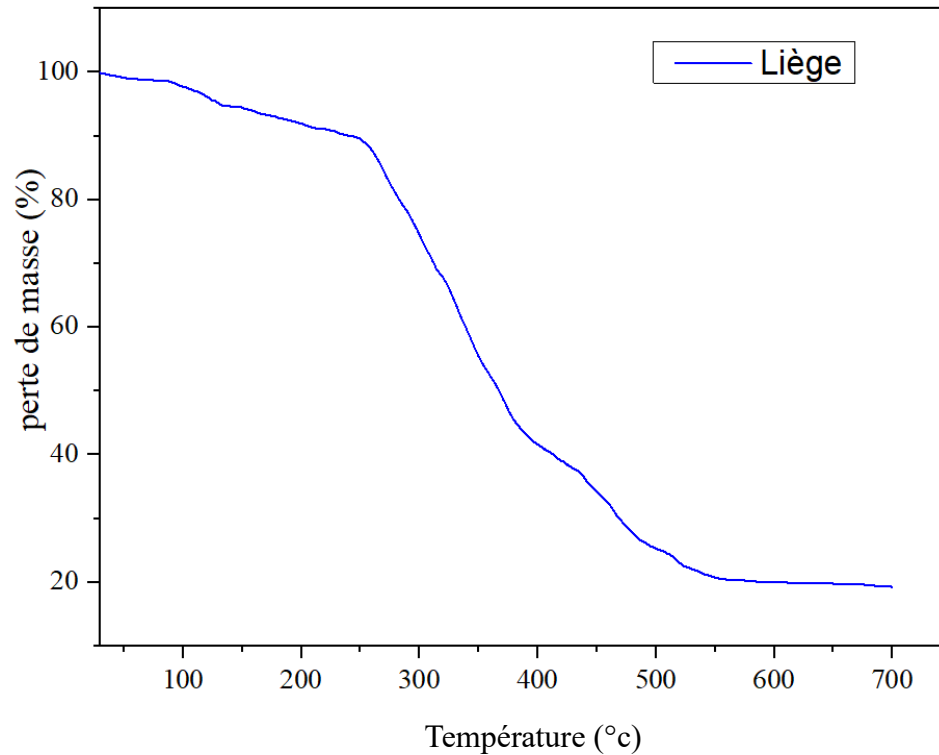


Figure. IV.2 : Courbe ATG de liège utilisé

Voici une analyse de la courbe :

1- Axe des abscisses (X) : Température

L'axe horizontal montre l'évolution de la température, probablement en degrés Celsius (°C), allant de basse température (à gauche) à plus élevée (à droite).

2- Axe des ordonnées (Y) : Masse (%)

L'axe vertical représente la masse restante de l'échantillon en pourcentage (%) de sa masse initiale.

3- Comportement de la courbe

- Phase initiale (jusqu'à environ 100–150°C) : La masse reste relativement constante, indiquant qu'il n'y a pas de perte de matière notable — cela correspond souvent à l'élimination de l'eau adsorbée ou de composés très volatils.
- Chute progressive entre 150°C et 500°C : Forte perte de masse, suggérant une décomposition thermique ou la libération de composants volatils (ex : matière organique, carbonates).
- Phase finale (au-delà de 500°C) : La courbe se stabilise, indiquant qu'il ne reste que des résidus inorganiques non volatilissables.

4- Interprétation spécifique pour Liège

- Le liège est un matériau organique composé majoritairement de subérine, lignine, et cellulose.
- La forte chute entre 150°C et 500°C correspond à :
 - Dégradation de la cellulose/hémicellulose (200–350°C)
 - Décomposition de la lignine et subérine (350–500°C)
- Ce comportement est typique pour les biomatériaux.

5- Utilité de l'analyse ATG

- Déterminer la composition thermique (teneur en matière organique vs inorganique)
- Évaluer la Stabilité thermique du liège
- Caractériser les différentes étapes de décomposition

IV.3 Caractérisations mécaniques

La caractérisation mécanique constitue une étape essentielle dans l'étude des matériaux, permettant d'évaluer leur comportement sous différentes sollicitations.

IV.3.1 Propriétés mécaniques en traction

Les propriétés mécaniques d'un matériau décrivent son comportement sous l'action de différentes sollicitations, telles que la traction, la compression ou la torsion. Parmi ces sollicitations, la traction joue un rôle fondamental dans la caractérisation des matériaux, notamment dans les domaines du génie mécanique, de la construction et des matériaux composites. L'essai de traction permet de déterminer un ensemble de propriétés mécaniques essentielles telles que la limite d'élasticité, la résistance maximale, le module de Young et l'allongement à la rupture. Ces paramètres sont indispensables pour le choix des matériaux dans des applications techniques précises, où les contraintes mécaniques sont souvent importantes. Cette étude vise donc à comprendre le comportement des matériaux sous l'effet d'une force de traction uni axiale, en analysant les résultats issus d'un essai standardisé.

La Figure V.3 de traction montre trois courbes correspondant à trois matériaux d'essai différents : *Mat 1*, *Mat 2* et *Mat 3*. Voici une analyse de ces courbes :

a- Zone élastique (partie initiale linéaire)

Toutes les courbes montrent une partie initiale linéaire, indiquant un comportement élastique où la déformation est réversible. Cette pente correspond au **module de Young (ou module d'élasticité)** :

- **Mat 1** a la pente la plus forte → module d'élasticité le plus élevé (plus rigide).
- **Mat 3** a la pente la plus faible → module d'élasticité le plus bas (plus souple).

b- Zone plastique (courbe non linéaire)

Après la limite élastique, les matériaux se déforment plastiquement (déformation permanente).

La courbe présente une concavité vers le haut, traduisant une augmentation progressive de la contrainte en fonction de la déformation.

c- Contrainte maximale (ou résistance à la traction)

- **Mat 1** : Contrainte maximale la plus élevée (~55 MPa).
- **Mat 2** : Moyenne (~48 MPa).
- **Mat 3** : Plus faible (~42 MPa).

Le matériau **Mat 1** présente la contrainte maximale la plus élevée, suivi par **Mat 2**, puis **Mat 3**, ce qui indique que **Mat 1** possède la meilleure résistance à la traction..

d- Allongement à la rupture

- Représente la ductilité (capacité à se déformer avant rupture).
- **Mat 3** semble avoir l'allongement à la rupture le plus élevé → le plus ductile.
- **Mat 1** semble casser brutalement après la contrainte max → matériau plus fragile ou plus rigide.

e- Interprétation comparative

- **Mat 1** : Matériau rigide et résistant, mais moins ductile.
- **Mat 2** : compromis entre rigidité, résistance et ductilité.
- **Mat 3** : plus ductile, mais moins rigide et moins résistant.

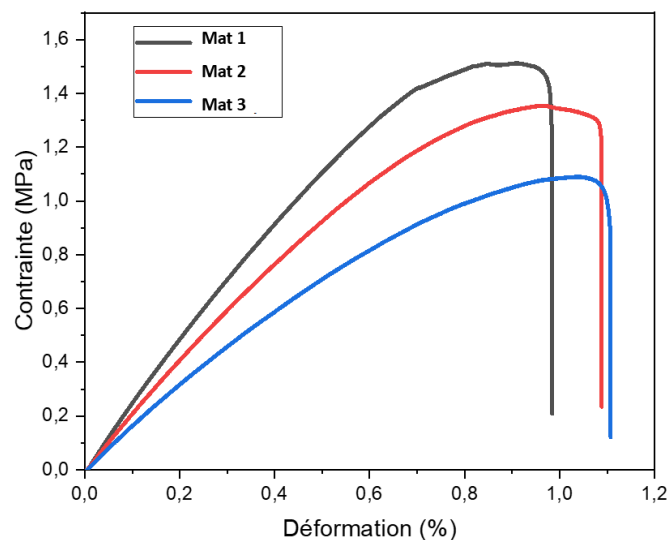


Figure.V.3 : Essai de traction pour les trois matériaux

La **Figure IV.4** présente les valeurs des modules d'élasticités E de différents matériaux (*Mat 1*, *Mat 2* et *Mat 3*).

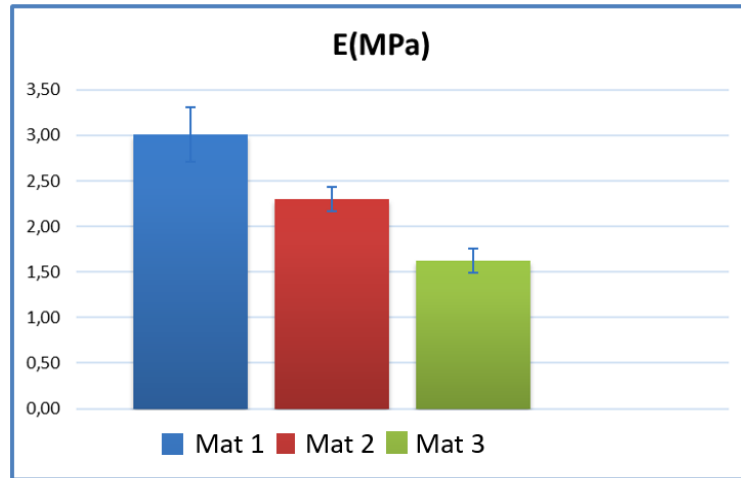


Figure.IV.4 : Différents valeurs de E des matériaux MAT 1, MAT 2 et MAT 3

La **Figure V.5** présente les valeurs des contraintes de différents matériaux (*Mat 1*, *Mat 2* et *Mat 3*).

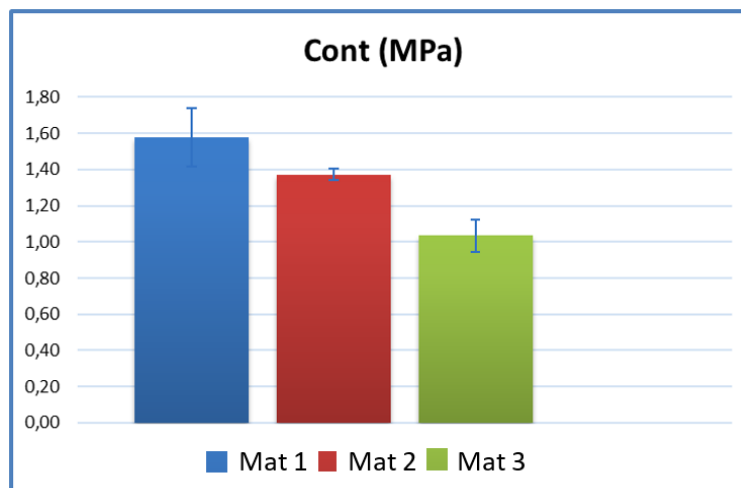


Figure.IV.5 : Différents valeurs des contraintes des matériaux *Mat 1*, *Mat 2* et *Mat 3*

La Figure V.6 présente les valeurs des déformations de différents matériaux (Mat 1, Mat 2 et Mat 3).

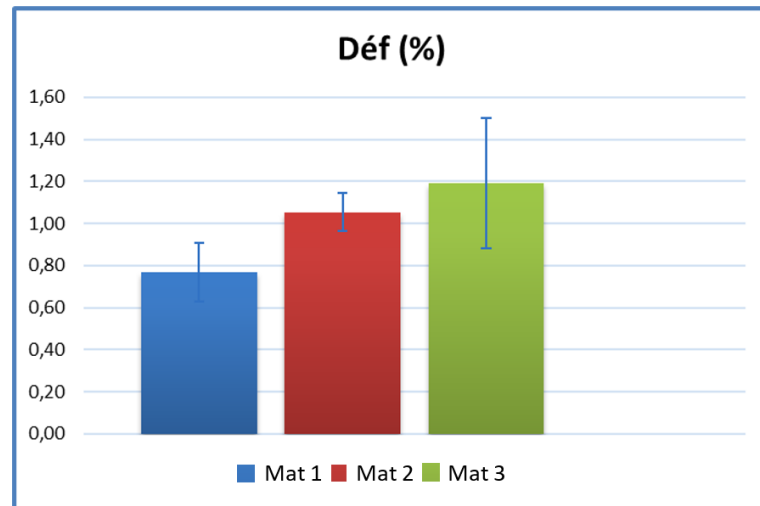


Figure.IV.7 : Différents valeurs des déformations des matériaux Mat 1, Mat 2 et Mat 3

V.3.1 Propriétés mécaniques en flexion

La flexion occupe une place importante, notamment dans les domaines de la construction, du génie mécanique et du design de structures composites.

La flexion désigne la déformation d'un matériau ou d'une pièce soumise à un moment fléchissant, c'est-à-dire une force perpendiculaire à son axe longitudinal. Cette sollicitation entraîne des contraintes de traction et de compression réparties de manière opposée sur les faces du matériau. L'analyse des propriétés mécaniques en flexion permet ainsi de déterminer des grandeurs clés telles que la résistance à la flexion, le module de flexion (ou module d'élasticité en flexion) et la déformation à la rupture.

Ces propriétés sont déterminées par des essais normalisés, tels que l'essai de flexion trois points ou quatre points, qui permettent de caractériser le comportement du matériau en situation réelle d'utilisation. L'objectif de cette étude est donc de mieux comprendre les mécanismes de flexion, d'analyser les résultats obtenus lors des essais expérimentaux, et d'évaluer la performance mécanique des matériaux testés.

La Figure V.6 montre les courbes de **flexion** typiques issues probablement d'un essai mécanique (test de flexion 3 points) pour trois matériaux ou configuration différentes notées **Mat 1**, **Mat 2** et **Mat 3**. Voici une **analyse détaillée** de ces courbes :

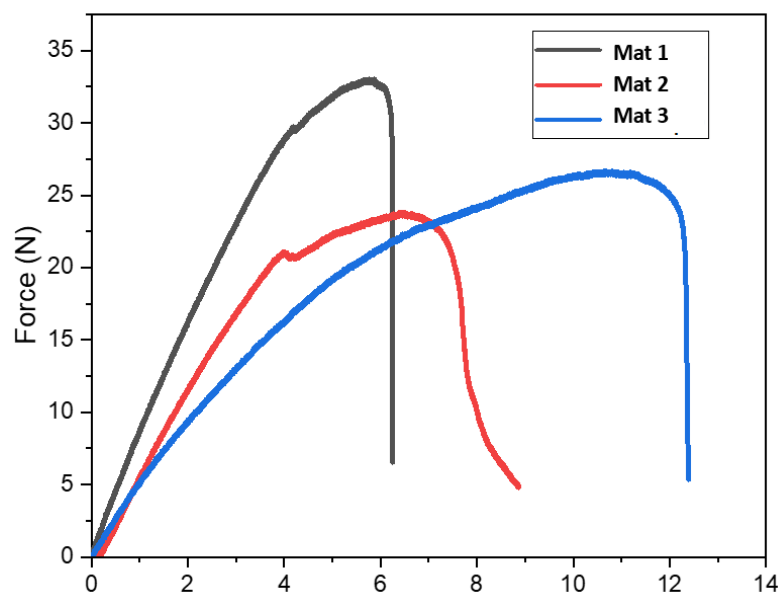
- **Courbes analysées :**

a- **Matériau *Mat 1*:**

- Monte rapidement en force.
- Atteint un **maximum élevé** suivi d'une chute **brutale** : comportement typique d'un matériau **cassant** (ex. : céramique, certains polymères rigides).
- **Bonne rigidité initiale** (pente forte au début).
- **Pas ou peu de déformation plastique.**

b- **Matériau *Mat 2*:**

- Moins rigide que MAT 1 au départ (pente plus douce).
- Atteint un **pic de force inférieur à *Mat 1***, puis chute progressivement.
- Ce comportement est typique d'un matériau ayant une **déformation plastique** significative avant rupture, ou bien un **composite partiellement ductile**.
- Peut indiquer une **transition plastique progressive**.



• **Figure.IV.8** : Essai de flexion pour les trois matériaux

c- Matériau **Mat 3**:

- Comporte une pente initiale comparable à **MAT 2**, mais plus prolongée.
 - Le **pic de force est le plus élevé** des trois.
 - **Chute post-pic plus douce**, ce qui suggère un bon **comportement ductile** ou **tenacité élevée**.
 - L'épaisseur étant plus grande, cela pourrait aussi contribuer à une **meilleure résistance** et **déflexion** accrue.
- *Comparaison des matériaux :*

Tableau.IV.1 : Comparaison entre les trois matériaux

Matériau	Rigidité initiale	Force max	Ductilité / Ténacité	Type de rupture
Mat 1	Élevée	Moyenne à haute	Faible	Cassante
Mat 2	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Transition ductile/cassante
Mat 3	Moyenne	Élevée	Élevée	Ductile ou tenace

- **Mat 1** : bon pour applications rigides où la fragilité n'est pas critique.
- **Mat 2** : compromis entre rigidité et ductilité.
- **Mat 3** : meilleur comportement global en flexion, surtout si une **déformation sans rupture brutale** est recherchée.

IV.4 Conclusion

Des tests de traction et de flexion ont été réalisés sur un nouveau matériau composite élaboré à partir de déchets plastiques et de liège. Les résultats obtenus démontrent un comportement mécanique prometteur, indiquant que ce composite pourrait représenter une alternative durable et performante aux matériaux conventionnels.

Cette étude met en lumière le potentiel de valorisation des déchets dans une optique d'économie circulaire et de développement de matériaux écologiques.

Conclusions générales

Conclusions générales

Dans le cadre de ce mémoire, un nouveau matériau composite a été élaboré à partir de déchets plastiques et de liège, dans une optique d'économie circulaire et de valorisation des résidus industriels et ménagers. Le choix de ces composants s'appuie non seulement sur leur disponibilité abondante, mais également sur leurs propriétés respectives : la résilience et la flexibilité des polymères plastiques d'une part, et la légèreté, l'isolation thermique et acoustique du liège d'autre part.

Les différentes formulations ont été soumises à des essais de caractérisation mécanique, et morphologique. Les résultats obtenus montrent que l'intégration de liège dans une matrice plastique permet d'améliorer certaines propriétés du matériau final, notamment en termes de légèreté, d'isolation thermique et de comportement face aux chocs. Néanmoins, certaines limites ont été observées, telles qu'une légère diminution de la résistance mécanique avec des taux élevés de liège, nécessitant une optimisation du ratio plastique/liège.

L'étude a permis d'élaborer un matériau composite en combinant des déchets plastiques, souvent sources de pollution persistante, avec du liège, un matériau naturel renouvelable reconnu pour sa légèreté, sa flexibilité et ses propriétés isolantes. Cette association a été pensée pour tirer profit des qualités mécaniques du plastique recyclé tout en y intégrant les avantages environnementaux et techniques du liège.

Ce travail a permis de démontrer la faisabilité technique de la création d'un matériau composite innovant, à la fois écologique et fonctionnel, susceptible d'être utilisé dans des applications variées telles que l'emballage, l'isolation ou même le mobilier.

En perspective, d'autres investigations pourraient être envisagées, notamment en variant les proportions plastiques/liège, en testant différents types de plastiques recyclés ou en ajoutant d'autres charges ou additifs. Une étude approfondie de la durabilité à long terme, de la résistance au vieillissement et des performances en conditions réelles d'utilisation serait également pertinente pour envisager une application industrielle.

Conclusion générale

En somme, ce travail contribue modestement mais concrètement à la recherche de solutions durables, en montrant que l'innovation peut naître de la revalorisation de nos déchets, et qu'il est possible de concevoir des matériaux performants tout en préservant l'environnement.

Bibliographie

- 1- Durand, M. (2021). *Recyclage et développement durable : enjeux et perspectives*. Paris : Éditions Écologie Active.
- 3-Wilson, D., Velis, C., et Cheeseman, C. R. (2006). Role of Informal Sector Recycling in Waste Management in Developing Countries. *Habitat International*, 30, 797-808.
- 4-Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.
- 5- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2010). *Materials science and engineering: An introduction* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- 6- Dufresne, A. (2006). *Ingénierie des matériaux composites*. Éditions Technip.
- 7- *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, Third Edition. CRC Press, 2007.
- 8- Gay, D., Hoa, S.V., & Tsai, S.W. (2003). *Composite Materials: Design and Applications*. CRC Press.
- 10- ONU Environnement (UNEP), 2018 – *Single-use plastics: A roadmap for sustainability*.
- 11-Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., ... & Law, K. L. (2015). *Plastic waste inputs from land into the ocean*. *Science*, 347(6223), 768-771.
- 12- ADEME (Agence de la transition écologique). *Le recyclage des plastiques*. Disponible sur : <https://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/gestion-dechets/recyclage-plastique> (consulté en mai 2025).
- 13-www.amorimcorkcomposites.com
- 14- Piqué, M., & Espelta, J. M. (2001). *Le chêne-liège (Quercus suber L.) : biologie, écologie et exploitation*. In *Les forêts méditerranéennes* (pp. 145-170). Éditions Quae.
- 15-Pétrissans, M., Pétrissans, A., Gérardin, P., & Perré, P. (2014). *Cork: Properties and Applications*. In *Bio-based Materials for Food Packaging* (pp. 41–67).

16- Pereira, H. (2007). Cork: Biology, Production and Uses. Elsevier.

18-Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2010). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (8th ed.). John Wiley & Sons.

Les images suivantes présentent les étapes principales d'élaboration de nouveau matériau composite a base liège et déchets plastique.



Liège Brute



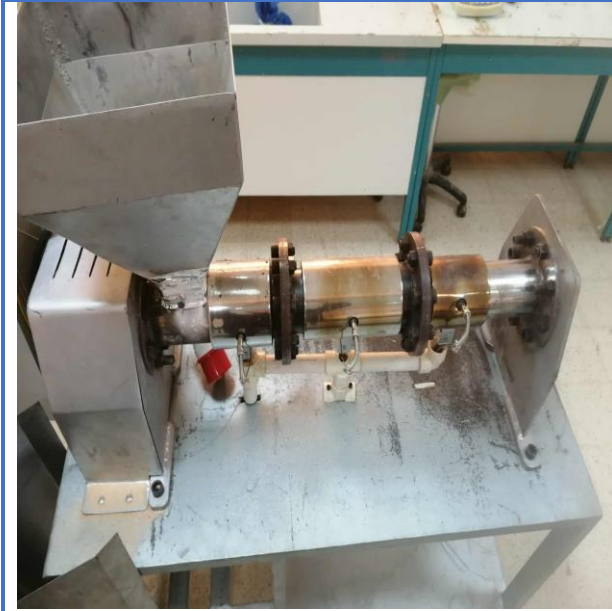
Déchets de plastique



Echantillant liège broyé



Echantillant de déchets de plastique



Extrudeuse



Produit malaxé



La presse



Découpage