



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



جامعة غرداية



حاضنة الأعمال لجامعة غرداية

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق

مذكرة تخرج لنيل شهادة ماستر في الهندسة الكيميائية وفق القرار الوزاري 008 المعدل للقرار 1275
شهادة تخرج - مؤسسة ناشئة / براءة اختراع

بعنوان:

تطوير وتوصيف مادة مركبة أساسها الزجاج والبولي إيثيلين منخفض الكثافة
المعاد تلويده لتطبيق مستدام

من إعداد الطالبين:

تحت إشراف: د. طويبي فريد

- باباواسماعيل محمد
- أداود رستم

الموسم الجامعي: 2024 / 2025 م



République Algérienne Démocratique et
Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et
de La Recherche Scientifique

Université de Ghardaïa



Incubateur Université de Ghardaïa

Faculté des sciences et techniques
Département de génie des procédés

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER en
génie chimique dans le cadre de la résolution ministérielle 008 modifiant
la résolution 1275

Mémoire de fin d'études – startup/brevet

Thème :

**Élaboration et caractérisation d'un matériau composite à
base de verre et de LDPE recyclés pour une
application durable**

Préparé par les étudiants

l'encadrant :

➤ BABAUSMAIL MOHAMMED

Dr. Touaiti Farid

➤ ADDAOU ROSTOM

Année universitaire : 2024–2025

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous remercions **Allah** Tout-Puissant de nous avoir permis de mener à bien ce travail. Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes ayant contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de cette thèse.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à notre encadreur de thèse, **Dr Farid Touaiti**, pour sa présence, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de ce projet. Sa rigueur scientifique et nous ont été d'une grande aide.

Nous remercions également les examinateurs monsieur **Dr Fenniche Fares** et remerciement spéciaux à **Dr Raache Imane**, pour leur accompagnement, ainsi que tous les professeurs du Département de génie des procédés pour la qualité de la formation dispensée tout au long de nos études.

Nous remercions également le directeur de l'Incubateur de l'Université de Ghardaïa, **Dr Taleb Ahmed Nour Eddine**, et le responsable de l'Incubateur de la Faculté des Sciences et Technologies, **Dr Mosbah Said**, pour nous avoir permis de développer ce projet dans un cadre innovant.

Nous tenons à remercier **Dr. Babaousmail Ismail**, responsable du laboratoire de SPA ALFAPIPE.

- **Dr Aouf Djaber**, chef du laboratoire de génie des procédés.
- **Dr Bouzid Ismail**, chef du laboratoire de génie civil.
- Chef du laboratoire d'analyses physico-chimiques CRAPC Ouargla, pour leur accueil et la mise à disposition du matériel nécessaire à la réussite de ce projet.

Nous tenons également à exprimer notre sincère gratitude à notre famille pour son soutien moral, sa patience et ses encouragements constants, ainsi qu'à nos amis et amis de promo pour leur aide et leurs conseils.

À vous tous, un grand merci du fond du cœur.

Dédicace

*Avec tous mes sentiments de respect. Avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma
remise de diplôme et ma joie*

*À ma chère mère et à mon cher père, Je vous dédie ce travail, fruit de vos prières, de votre
patience et de votre amour inconditionnel.*

*À toute ma famille, et à la mémoire de mon grand-père – que Dieu lui accorde Sa miséricorde
et l'accueille dans Son vaste paradis.*

À mes camarades d'études, Et plus particulièrement à mon collègue et ami

*ADDOUD ROSTOM, Merci pour les efforts partagés et les défis surmontés ensemble. Vous
avez été un véritable soutien.*

*À tous nos professeurs du département de génie des procédés de l'Université de Ghardaïa
pour tout ce qu'ils nous ont apporté durant notre parcours académique.*

Et enfin.....

À tous ceux qui ont cru en moi et m'ont encouragé même d'un mot,

Je te dédie cette remise de diplôme, tu en fais partie.

BABAOUSMAIL MOHAMMED

Dédicace

Avec une profonde reconnaissance et gratitude, je dédie cet humble travail à ceux qui m'ont soutenu et aidé tout au long de mon parcours académique.

À mes chers parents, ma mère et mon père bien-aimés, symboles de générosité et source éternelle de sacrifice et de compassion.

À mon grand-père et ma grand-mère bien-aimés,

À mes frères et à ma famille, qui m'ont soutenu tout au long de ces années par leur compassion et leur soutien moral.

À mes estimés professeurs, qui ont illuminé mon chemin de connaissance par leur générosité et leurs efforts.

À tous mes amis et camarades de classe, partenaires de réussite et d'épreuves.

*Je mentionne tout particulièrement mes fidèles collègues, **Mohammed babaousmail***

Je dédie cet ouvrage à moi-même, pour les efforts et la détermination dont j'ai fait preuve pour atteindre ce moment.

Tous les remerciements et toutes les louanges reviennent à Dieu, qui m'a guidé et facilité ce succès, et qui m'a entouré de cœurs sincères qui m'ont soutenu et élevé.

Rostom ADDAOU

Résumé

Cette étude vise à développer un matériau composite à partir de verre et de plastique recyclés, dans une démarche de valorisation des déchets solides à la fois écologique et économique.

Après collecte, les matériaux ont été nettoyés, broyés ou découpés, puis mélangés en différentes proportions et moulés pour former des échantillons.

Divers tests (mécaniques, thermiques et microscopiques) ont montré que l'ajout de verre améliore la rigidité et la résistance à la traction du composite. L'analyse thermique (DSC) a permis de déterminer les températures de transition, tandis que l'observation microscopique a confirmé une bonne homogénéité.

Ce matériau présente des propriétés prometteuses pour des applications variées, notamment dans l'emballage, l'isolation, les équipements sportifs, les transports et le domaine médical. Son élaboration à partir de déchets recyclés en fait une solution durable et avantageuse.

Mots-clés : matériau composite, verre, polyéthylène, recyclage, toluène.

Abstract

This study focuses on developing a composite material made from recycled glass and plastic, as part of an environmentally and economically sustainable approach to solid waste recovery.

After collection, the materials were cleaned, ground or cut, then mixed in various proportions and molded into samples. Mechanical, thermal, and microscopic tests showed that adding glass enhances the rigidity and tensile strength of the composite.

Thermal analysis (DSC) identified key transition temperatures, while microscopic observation confirmed good material homogeneity. The resulting composite exhibits promising properties for use in packaging, insulation, sports equipment, transportation, and medical devices. Its production from recycled waste makes it a sustainable and cost-effective solution.

Keywords: composite material, glass, polyethylene, recycling, toluene.

الملخص

تركّز هذه الدراسة على تطوير مادة مركبة باستخدام الزجاج والبلاستيك المعاد تدويرهما، ضمن مقارنة تهدف إلى استرجاع النفايات الصلبة بطريقة بيئية واقتصادية مستدامة.

بعد جمعها، خضعت المواد للتنظيف والتقطيع أو الطحن، ثم مزجت بنسب مختلفة وسُبكت في قوالب لتشكيل عينات. أظهرت الاختبارات الميكانيكية والحرارية والمجهريّة أن إضافة الزجاج حسّنت من صلابة المادة ومقاومتها للشد.

أما التحليل الحراري (DSC) فقد مكّن من تحديد درجات الانتقال الحراري، بينما أكدت الفحوصات المجهرية على تجانس جيد في بنية المادة. أظهرت النتائج أن المادة المركبة الناتجة تتمتع بخصائص واعدة تؤهلها للاستخدام في مجالات مثل التغليف، العزل، المعدات الرياضية، النقل، والأجهزة الطبية. كما أن تصنيعها من نفايات معاد تدويرها يجعلها خيارًا اقتصاديًا ومستدامًا.

الكلمات المفتاحية: مادة مركبة، زجاج، بولي إيثيلين، تدوير، طوليان .

Liste des figures

CHAPITRE I : les matériaux composites et recyclé

Figure I . 1 : Différentes familles de matrice.	4
Figure I . 2 : Type de renfort.	6
Figure I . 3 : Les fibres de verre.	7
Figure I . 4 : Les fibres de carbone.	7
Figure I . 5 : Fibres d'aramide.	7
Figure I . 6 : Fibres naturelles.	7
Figure I . 7 : Les avantages de matériaux composites.	9
Figure I . 8 : Schéma des caractéristiques géométriques et spatiales des renforts dans les composites : (a) concentration, (b) taille, (c) forme, (d) distribution et (e) orientation.	12
Figure I . 9 : Représentation semi-développée de la chaîne macromoléculaire du Polyéthylène	16
Figure I . 10 : Représentation physique de LDPE.	16
Figure I . 11 : Représentation des différentes échelles structurales d'un matériau.	17
Figure I . 12 : Evolution du mode de synthèse du polyéthylène.	19
Figure I .13 : Les types de polyéthylène.	21
Figure I . 14 : Logo de recyclage du polyéthylène a base densité.	24
Figure I . 15 : Différent types de verre.	26
Figure I .16 : Les types de verre.	27
Figure I .17 : Trajectoire du rayon pour la méthode du prisme de détermination de l'indice de réfraction.	31
Figure I .18 : Surface de fracture d'une plaque de verre plate avec miroir de fracture et moucheté fin et grossier ainsi que moucheté de vitesse (branchements de fissures), de Kerkhof (épaisseur de la plaque : 6,2 mm).	31
Figure I .19 : Répartition des déchets collectés par catégorie (2019/2020).	38

CHAPITRE II: Partie expérimentale

Figure II. 1 : Les étapes de préparation de LDPE.	39
Figure II. 2 : Les étapes de préparation de verre.	40
Figure II. 3 : Tamisage de poudre de verre $t=90\text{min}$	40
Figure II. 4 : La masse et l'épaisseur de morceau du plastique.	41
Figure II. 5 : La masse de plastique et le volume de toluène.	43
Figure II. 6 : Mélanger et agiter les constituants.	43

Liste des figures

Figure II. 7 : La pâte homogène.	44
Figure II. 8 : Les masses de LDPE et de verre.	44
Figure II. 9 : Agitation les 3 constituants.	45
Figure II. 10 : Contrôler la collection.	45
Figure II. 11 : Dégazage des échantillons.	46
Figure II. 12 : Moulage des échantillons.	47
Figure II. 13 : Les échantillons finals.	47
Figure II. 14 : Adapter l'échantillon sur la plaque chauffante.	48
Figure II. 15 : Les trois spécimens.	49

Chapitre III : Résultats et Discussion

Figure III. 1 : Courbe de granulométrie.	52
Figure III. 2: La courbe d'allongement nominale	53
Figure III. 3: Les résultats du module d'élasticité des différent composites et LDPE pur. ...	54
Figure III. 4 : La machine de DSC.	56
Figure III. 5: Les graphes de DSC.	57
Figure III. 6 : énergie absorbé par masse(j/g).	58
Figure III. 7: La morphologie de composite	59

Liste des annexes

Liste des annexes

Annexe 1 : Machine d'essais de traction Zwick / Roell

Annexe 2 : La calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

Annexe 3 : Microscope optique

Annexe 4 : les solvants

Liste des tableaux

Chapitre I : les matériaux composites et recyclé

Tableau I. 1 : Résume les avantages et les inconvénients.....	12
Tableau I. 2 : Résume les avantages et les inconvénients.....	22
Tableau I. 3 : Valeurs de viscosité, calculées en utilisant l'équation VFT, du verre à thermomètre Jena 16 III (η en dPa s).....	28
Tableau I. 4 : Les propriétés de verre.....	35
Tableau I. 5 : Quantité de déchets valorisés en Algérie en 2019	37
Tableau I. 6 : Quantité de déchets recyclables en Algérie par année.....	37

Chapitre II : Technique expérimentale

Tableau II. 1 : Les propriétés des produits chimiques.	42
Tableau II. 2 : La formulation du composite (LDPE/verre).	46
Tableau II. 3 : Type 1B Spécimen.	49

Chapitre III : Résultats et Discussion

Tableau III. 1 : Les différentes masses de passé et de refus selon les diamètres des tamis...51	51
Tableau III. 2 : Résumer des résultat du essai de traction.	53
Tableau III. 3 : Les résultats pour les composite fabrique.....	54
Tableau III. 4 : comparaison entre module d'élasticité d'autres matériaux composites.....	55
Tableau III. 5: Le résultat de DSC.....	58

Liste des abréviations

Liste des abréviations

VFT equation	Vogel-Fulcher-Tammann equation
FRCs	fiber reinforced composites
GFRP	Glass fiber–reinforced plastics
PMCs	Polymer matrix composites
DSC	Differential Scanning Calorimetry
ALR3	Algae light reactor
LDPE	low-density polyethylene
ZR	Zirconium
Ti	Titanium

Liste des symboles

σ_x	Contrainte pour allongement x1%
σ_m	Résistance à traction
ϵ_m	Allongement pour résistance à traction
σ_b	Contrainte à rupture
ϵ_{tb}	Allongement nominale à rupture
b	Largeur éprouvette
h	Epaisseur éprouvette
w_r	Fraction massique du renfort
w_m	Fraction massique de la matrice
ω_c	La densité massique du composite
ω_r	La densité massique du renfort
ω_m	La densité massique de la matrice
r_c	La densité massique de la composite (éq :3,4)
r_r	La densité massique du renfort (éq :3,4)
r_m	La densité massique de la matrice (éq :3,4)
X_c	Propriété particulière du composite
X_r	Propriété particulière du renfort
X_m	Propriété particulière de de la matrice
V_r	La fraction volumique de renfort
V_m	La fraction volumique de la matrice

Sommaire

Remerciement	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
الملخص	VI
Liste des figures	VII
Liste des annexes.....	IX
Liste des tableaux.....	X
Liste des abréviations.....	XI
Liste des symboles	XII
Introduction générale	1
CHAPITRE I : Matériaux composites et recyclé.....	2
I.1 Introduction	3
I.2 Présentation des matériaux composites	3
I.3 Structure des matériaux composites	4
I.3.1 Matrices	4
I.3.2 Renforts (phase mineur)	6
I.3.3 Additifs	8
I.3.3.1 Charges renforçâtes	8
I.3.3.2 Charges non renforçâtes	8
I.3.3.3 Agent fonctionnelle	8
I.4 Classification des matériaux composites.....	8
I.5 Avantages et les inconvénients	9
I.6 Propriétés des matériaux composites	12
I.7 Application industrielle des matériaux composites	15
I.8 Matériaux utiliser dans les composites.....	16
I.8.1 Plastique (polyéthylène)	16
I.8.1.1 Introduction	16
I.8.1.2 Structure du polyéthylène	16
I.8.1.3 Synthèse et mise en forme du polyéthylène	17
I.8.1.4 Types de polyéthylène	20

Sommaire

I.8.1.5 Propriétés du polyéthylène	21
I.8.1.6 Applications du polyéthylène	23
I.8.1.7 Recyclage et la dégradation du polyéthylène	23
I.8.1.8 Additifs au recyclage	24
I.8.2 Verre	25
I.8.2.1 Définition de verre	25
I.8.2.2 Types de verre	26
I.8.2.3 Propriétés de verre	28
A. Viscosité	28
B. Densité	29
C. Propriétés optiques	30
D. Propriétés Mécaniques	31
E. Propriétés électriques	32
F. Tension superficielle	32
G. Résistance chimique	33
H. Propriétés thermiques	35
I.9 Recyclage	36
I.9.1 Notions sur le recyclage	36
I.9.2 Impacts du recyclage sur l'environnement	36
I.9.3 importance du recyclage dans l'industrie	37
I.9.4 Quelques statistiques de déchets en Algérie.....	37
a. Déchets valorisés en Algérie en 2019	37
b. Quantité de déchets recyclables en Algérie	37
c. Différent catégorie de déchets	38
I.10 Conclusion	38
CHAPITRE II :Partie expérimentale	39
II.1 Introduction	39
II.2 Matériaux et méthodes	39
II.2.1 Procédé de préparation de la matière première	39
A- Plastique	39
B- Verre	40
II.2.2 Procédés de Caractéristique	41
II.2.2.1 Densité de Plastique	41

Sommaire

II.2.2.2 Verre	42
II.2.2.3 Solvant.....	42
II.2.3 Méthode de préparation de composte (LDPE/ VERRE).....	43
II.2.4 Préparation des échantillons.....	46
II-3 Procédé de caractérisation pour essai de traction (ISO 527-4).....	48
CHAPITRE III :Résultats et Discussion.....	50
III. 1 Introduction.....	51
III. 2 Caractéristiques du granulométrie de verre par tamisage	51
III.3 Teste mécaniques (résistance à la traction).....	52
III.3.1 Les résultats de traction	53
III.4 La calorimétrie différentielle à balayage (DSC).....	56
III.4.1 Les résultats de DSC	57
III.5 Conclusion	59
Conclusion générale.....	59
Références bibliographiques.....	62
Annexes.....	68

Introduction générale

Face à l'augmentation préoccupante des déchets solides en Algérie, notamment les déchets plastiques et verriers, la gestion durable de ces ressources devient une priorité nationale. Selon l'Agence Nationale des Déchets (AND), l'Algérie génère plus de 13 millions de tonnes de déchets ménagers par an, dont environ 1,2 million de tonnes de plastiques et plus de 300 000 tonnes de verre, tandis que le taux de recyclage global reste inférieur à 10 %. Ces chiffres révèlent un potentiel important de valorisation encore largement sous-exploité.[1]

L'élaboration de matériaux composites à base de verre et de plastique recyclé représente une approche innovante dans le domaine des matériaux durables, répondant à la fois aux enjeux environnementaux et aux besoins industriels.

Ces composites allient les propriétés mécaniques et thermiques du verre aux caractéristiques du plastique recyclé, offrant ainsi une alternative écologiquement responsable aux matériaux traditionnels.

Le plastique, en général, est connu comme un matériau synthétique ou semi-synthétique fabriqué à partir de polymères. Ces polymères sont souvent dérivés de ressources fossiles comme le pétrole, le gaz naturel ou le charbon.[2]

Le verre, connu pour sa résistance et sa durabilité, se combine ici avec des plastiques recyclés, réduisant ainsi l'empreinte carbone liée à la production de matériaux neufs.[3]

Ce type de composite peut être utilisé dans diverses applications, notamment dans le secteur automobile, le bâtiment, et l'électronique, contribuant à la réduction des déchets plastiques tout en optimisant les performances des matériaux.

La préparation de tels composites implique des processus complexes de sélection, de traitement et de mise en forme des matériaux, nécessitant une étude approfondie de leurs propriétés mécaniques, thermiques et environnementales afin d'assurer leur efficacité et leur pérennité dans des applications concrètes.

- La problématique qui se pose est :

Comment transformer les déchets plastiques et verriers en un matériau composite performant, capable de réduire la pollution (environnementale) et de contribuer au développement durable à travers le recyclage et l'innovation scientifique.

CHAPITRE I :
Matériaux composites
Et recyclé

I.1 Introduction

Un matériau composite est défini comme étant un assemblage d'au moins deux constituants non miscibles, mais ayant une forte capacité d'adaptation. Les qualités respectives constituants associés se complètent pour former un matériau aux performances mécaniques, thermiques, électriques et/ou physico-chimiques améliorées. Le développement des matériaux composites ayant une ou plusieurs de ces propriétés particulières répond généralement à un besoin spécifié. Il est ainsi possible de créer des matériaux hétérogènes permettant par exemple, de réduire la masse d'une pièce, tout en améliorant ses propriétés mécaniques, grâce à l'association d'un renfort fibreux et d'une résine organique. L'adaptabilité de ce matériau en fait un atout incontestable qui explique son utilisation de plus en plus répandue, notamment dans l'industrie du transport (aérien, maritime et ferroviaire), des sports et loisirs, et depuis peu dans l'industrie du bâtiment.

I.2 Présentation des matériaux composites

Le matériau composite est constitué d'un renfort (phase mineur), qui contribue aux propriétés mécaniques de la pièce, et d'un liant, appelé matrice (phase dominant). Le rôle de la matrice est d'assurer la cohésion entre les éléments du renfort, mais aussi de transférer les flux d'efforts entre différent constituants, de garantir la tenue à l'environnement (corrosion, vieillissement humide) et la tenue en température. Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites qui peuvent être classés suivant différents critères. La nature de la matrice est un de ces critères qui permet de répartir les composites en trois grandes familles :

- **Les Composites à Matrices Organiques (CMO)** : telles que les polymères, les résines et matériaux organiques (Résine thermodurcissable ou thermoplastique)
- **Les Composites à Matrices Céramiques (CMC)** : la matrice généralement forme par un matériau céramique ces composites sont réservés aux applications à haute Température.
- **Les Composites à Matrice Métallique (CMM)**

Ces matériaux peuvent aussi être classés selon la nature du renfort, détaillée ci-après ou selon l'objectif recherché via leurs utilisations. Si l'optimisation des coûts est le principal objectif, on parlera de composites 'grande diffusion'. En revanche, pour une utilisation dans le but d'optimiser les performances mécaniques ou thermiques, liées à une réduction de poids, on parlera de composite 'hautes performances' .[4]

I.3 Structure des matériaux composites

I.3.1 Matrices :

La matrice a pour objectif principal de transmettre les efforts mécaniques au renfort. Elle doit aussi assurer la protection du renfort vis à vis des diverses conditions environnementales (corrosion, oxydation, vieillissement humide...). Dans le cas des CMO, un très grand nombre de polymères peuvent être utilisés comme matrices. Ces résines synthétiques résultent de composés chimiques obtenus par réticulation d'une macromolécule (association de molécules appelées monomères), sous l'action de la chaleur et/ou d'un catalyseur. Le Diagramme présenter dans la figure (I.1) Trois catégories de ces matières plastiques peuvent cependant être distinguées :

- Les polymères thermoplastiques.
- Les polymères thermodurcissables.
- Les élastomères.

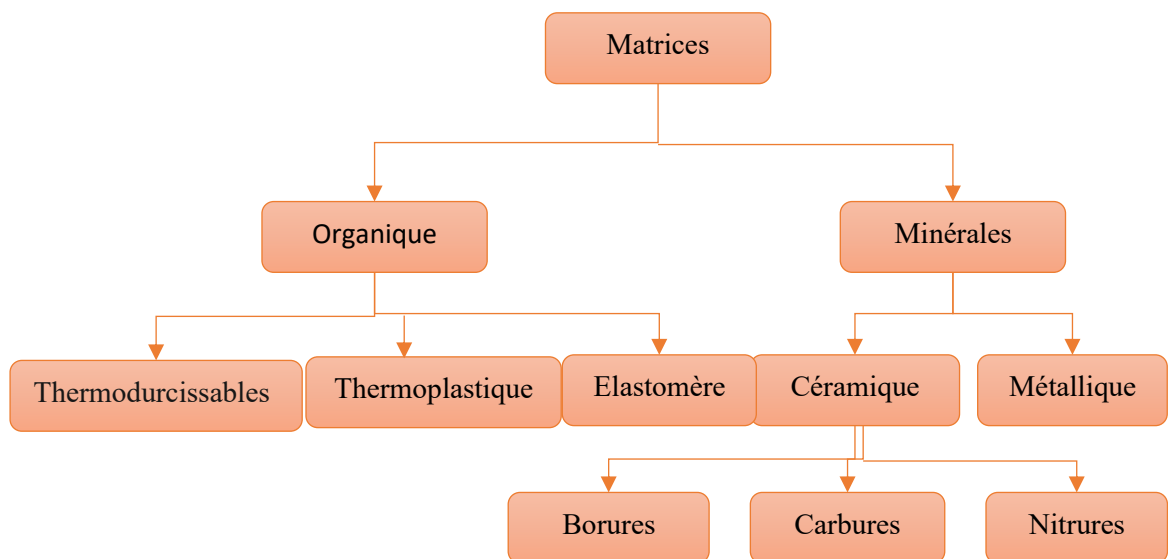


Figure I. 1 : Différentes familles de matrice.

Les résines les plus employées dans les matériaux composites organique (CMO) sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques

- ❖ **Les résines thermodurcissables** : sont les produits les plus employés comme matrice de matériaux composites "structuraux". Généralement associées avec des fibres longues ou granules, elles sont liquides ou liquides visqueux et réticulent sous l'action thermiquement activée d'un catalyseur et d'un durcisseur. La transformation est irréversible et forme un produit infusible et insoluble.

Actuellement, les résines thermodurcissables principalement utilisées sont les suivantes :

- Les résines époxydes qui possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. Ces résines réticulant à 180°C, sont souvent utilisées avec un renfort en fibres de carbone ou de verre parfois pour la réalisation de pièces structurales aéronautiques.
- Les résines phénoliques utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue au feu imposées par les normes dans les transports civils. Ces polymères auto extinguisibles Présentent le désavantage d'être peu résistant aux sollicitations mécaniques.
- Les résines polyamides sont elles aussi très onéreuses, mais présentent d'excellentes Propriétés mécaniques notamment à haute température.

En dépit de leurs bonnes tenues mécaniques, ces résines sont très sensibles aux chocs.

Afin de pallier cet inconvénient, il est possible d'améliorer leur ténacité en les mélangeant avant

Polymérisation à des résines thermoplastiques.

❖ **Les résines thermoplastiques** : Ce sont des polymères pouvant être alternativement ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité

- ❖ **Les élastomères** : sont des polymères naturels ou synthétiques dont la structure particulière confère une importante élasticité (jusqu'à 5 fois leur d'allongement à la taille initiale).

A titre d'exemple, nous pouvons citer les élastomères suivants : les silicones d'élastomères, Les polyuréthanes, le néoprène, le latex, etc....

I.3.2 Renforts (phase mineur) :

Il existe deux types de renfort : organiques et inorganiques, (comme indiqué la figure (I.2)) le premier type consiste les polyesters et aramides, Le deuxième type comprend les minéraux et végétaux

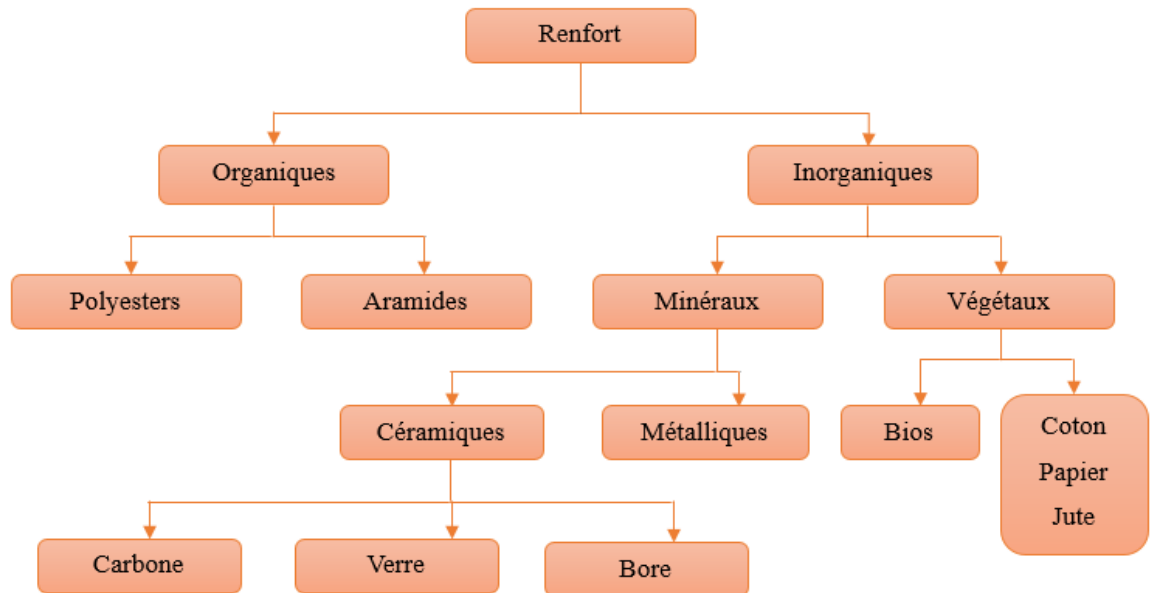


Figure I. 2 : Type de renfort.

Le renfort du matériau composite est le constituant qui supporte la plus grande partie des efforts mécaniques. Il peut se présenter sous différentes formes (géométries) :

- **Particulaire** : charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écailles ou de poudre micro ou nano particulaire comme :
- **Particules de céramique** : Les particules de céramique peuvent être intégrées comme renforts dans les composites afin d'améliorer leur résistance à l'usure, à la chaleur et à la corrosion.
- **Nanotubes de carbone** : Ces nanotubes présentent des propriétés exceptionnelles en termes de résistance et de conductivité électrique. Ils sont employés dans des applications de pointe, telles que la nanotechnologie et les matériaux composites hautes performances. [5]
- **Fibres courtes** : pour les renforts surfaciques non texturés, tels que le mat,
- **Fibres continues** : pour les renforts texturés, tels que les tissus (taffetas, sergé, satin, etc.), ou les renforts unidirectionnels, tels que les nappes. [6]

Les fibres continues sont le plus utiliser dans les applications technologiques, aujourd'hui ils pouvant être classé comme suite :

- **Les fibres de verre** : sont couramment employées comme renfort dans les matériaux composites en raison de leur légèreté, de leur résistance à la corrosion et de leur coût relativement bas.



Figure I. 3 : Les fibres de verre.

- **Les fibres de carbone** : offrent une excellente résistance spécifique et une rigidité élevée. Elles sont fréquemment utilisées dans des applications exigeant une légèreté et une résistance exceptionnelles, comme l'aérospatiale, l'automobile haut de gamme et les équipements sportifs.

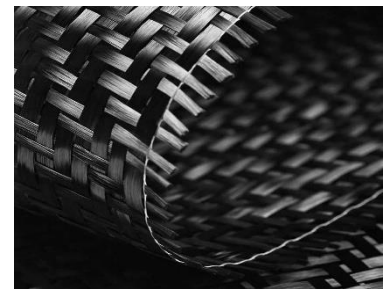


Figure I. 4 : Les fibres de carbone.

- **Fibres d'aramide** : (comme le Kevlar) : Les fibres d'aramide sont reconnues pour leur haute résistance à la traction, leur faible poids et leur résistance aux produits chimiques. Elles sont fréquemment employées dans des applications exigeant une résistance balistique, comme les gilets pare-balles, ainsi que dans d'autres domaines où la résistance et la légèreté sont essentielles.



Figure I. 5 : Fibres d'aramide.

- **Fibres naturelles** : Certaines fibres naturelles, comme le lin et le chanvre, sont également utilisées comme renforts dans les matériaux composites. Elles sont appréciées pour leur légèreté, leur caractère renouvelable et leur faible impact environnemental.



Figure I. 6 : Fibres naturelles.

I.3.3 Additifs

Les formulations du matériau composites peut contenue des additives pour des raisons spécifiques comme de renforcement, cout ou améliore certains aspects esthétiques ou fonctionnelle.

I.3.3.1 Charges renforcâtes :

L'objet de l'incorporation de charges renforcâtes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en Charges sphériques et non sphériques. [7]

I.3.3.2 Charges non renforcâtes :

Les charges non renforcâtes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines.

Parmi ces classes on trouve : Charges de faible coût, ignifugeantes et conductrices et antistatiques. [7]

I.3.3.3 agent fonctionnelle :

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et Interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage,
- Pigments et colorants.
- Agents anti-retrait et agents anti-ultraviolets. [7]

I.4 Classification des matériaux composites

La classification des matériaux composites repose sur leur structure et leurs composants.

En fonction de la structure des composants, les composites sont divisés en deux catégories.

Composites à fibres : Ce sont des matériaux renforcés par des fibres (longues, courtes ou coupées). L'alignement et la disposition de ces fibres influencent les caractéristiques mécaniques du matériau composite, qui peuvent être ajustées et adaptées en fonction des variations dans la composition des constituants, de leur proportion et de l'orientation des fibres.

Composites à particules : Un matériau composite à renfort de particules est constitué de particules dispersées, ne possédant ni dimensions ni formes bien définies. L'utilisation de ce type de matériau est relativement limitée, les particules étant principalement ajoutées pour réduire le coût du matériau tout en conservant certaines de ses propriétés mécaniques.

I.5 Avantages et les inconvénients

Le principal avantage des composites réside dans leur rigidité et leur résistance spécifiques élevées. Par conséquent, le poids des pièces ou équipements peut être considérablement réduit en utilisant des composites. Par exemple, si un composant est conçu pour une capacité de charge spécifique, un composant en GRP (polymère renforcé de verre) pèsera seulement un quart d'un composant en acier. La réduction de poids est une préoccupation majeure dans les secteurs aérospatial et automobile. Ainsi, les matériaux composites ont un avantage évident par rapport aux matériaux conventionnels dans ces domaines.[8]

Le deuxième avantage des composites est leur efficacité énergétique. La plupart des composites utilisés actuellement sont à base de polymères. Ces composites polymères peuvent être produits à température ambiante ou légèrement au-dessus, souvent nécessitant seulement quelques centaines de degrés au-dessus de la température ambiante. Par conséquent, très peu d'énergie est nécessaire pour leur production.

Comme mentionné précédemment, l'utilisation généralisée des composites polymères dans les avions et les automobiles réduit le poids total, améliorant ainsi l'efficacité énergétique. Les composites sont efficaces sur le plan énergétique pour ces deux raisons.

En général, les polymères présentent une meilleure résistance aux intempéries que les matériaux métalliques. Dans les composites à matrice polymère (PMC), seule la matrice polymère est exposée à l'environnement. Ainsi, les PMC offrent également une excellente résistance aux intempéries.



Figure I. 7 : Les avantages de matériaux composites.

Dans certaines structures, les propriétés mécaniques doivent être élevées dans une direction spécifique, mais ne sont pas critiques dans d'autres directions.

Les composites sont particulièrement adaptés à ce type d'applications. Il est possible de concevoir des composites avec des propriétés souhaitées.

Un renfort, une matrice et une méthode de traitement appropriés peuvent être sélectionnés parmi une large variété d'options.

L'estimation théorique des propriétés des composites pour tout type de renfort et de matrice avec différentes orientations de fibres est désormais simple, grâce à la disponibilité de nombreux logiciels.

Des formes complexes peuvent être facilement produites avec des composites. Les méthodes de traitement des composites, en particulier des composites polymères, sont suffisamment avancées pour créer n'importe quelle forme complexe. La plupart des composites polymères sont traités à température ambiante ou légèrement au-dessus (environ 150°C). Par conséquent, les équipements et outils de traitement n'ont pas besoin d'être hautement spécialisés.

Les composites peuvent également être conçus pour combiner plusieurs propriétés souhaitées. Par exemple, dans des applications comme les pièces de carrosserie automobile, il est essentiel d'avoir de bonnes propriétés mécaniques ainsi qu'une isolation thermique et un aspect esthétique. [9]

Les composites polymères peuvent offrir toutes ces propriétés. De même, pour les couvercles de composants électroniques, une certaine conductivité électrique est souhaitable pour éviter l'accumulation de charges statiques.

En incorporant un matériau conducteur dans le polymère, il est possible de produire un composite avec une conductivité électrique.

Parmi les inconvénients des matériaux composites on peut citer leur coût élevé car ces composites sont plus coûteux que les matériaux conventionnels sur une base de coût à coût. Les composites sont environ 5 à 20 fois plus chers que l'aluminium et l'acier, respectivement, sur une base de poids. Cependant, les niveaux de performance des composites sont nettement supérieurs. Les composites ne trouvent leur place que lorsque la haute performance est un facteur primordial dans la sélection des matériaux.

La probabilité de formation de défauts à l'interface est élevée, car les composites sont fabriqués à partir de matériaux totalement différents. À moins que de grandes précautions ne soient prises pendant le traitement, les défauts sont inévitables.

La plupart des composites renforcés de fibres (FRCs) sont de nature anisotrope. L'application accidentelle d'une contrainte élevée dans la direction transversale des fibres peut endommager le produit.

Le taux de production des composites est généralement faible. Les composites peuvent ne pas être adaptés aux industries à volume de production élevé, comme l'industrie automobile. Le problème du faible taux de production est partiellement résolu avec les composites thermoplastiques et les composés de moulage.

La sélection d'un matériau approprié parmi les matériaux métalliques conventionnels est relativement facile en raison de la disponibilité de bases de données largement acceptées sur leurs propriétés. Cependant, une base de données similaire pour les propriétés des différents composites n'est pas facilement disponible. Cela constitue un autre inconvénient pour les composites.

Le recyclage est un autre défi pour l'utilisation généralisée des composites. Le recyclage des composites est plus difficile que celui des matériaux métalliques conventionnels. L'excellente résistance aux intempéries des matrices polymères, bien qu'utile en utilisation, devient un obstacle lors du recyclage. Actuellement, plusieurs options sont disponibles pour le recyclage des composites, mais ces options sont relativement coûteuses.[10]

On résume les avantages et les inconvénients dans le tableau suivant :

Tableau I. 1 : Résume les avantages et les inconvénients.

Avantages	Inconvénients
Rigidité et résistance élevées avec un poids réduit	Coût plus élevé que les matériaux conventionnels
Efficience énergétique (fabrication à basse température)	Probabilité de formation de défauts à l'interface
Résistance aux intempéries	Anisotropie des propriétés
Propriétés mécaniques sur demande (conception sur-mesure)	Cadences de production faibles, pas idéales pour la grande série
Formes complexes faciles à fabriquer	Difficulté de choix de matériau (base de données limitée)
Combinaison de propriétés (mécaniques, esthétiques, conductrices...)	Recyclage difficile et coûteux
Gain de poids, économies d'énergie en service	

I.6 Propriétés des matériaux composites :

Les propriétés d'un composite sont fonction des propriétés des phases constitutives et de leurs proportions relatives, taille, forme, distribution et orientation de la phase dispersée.

Ces caractéristiques sont illustrées dans la figure (I.8)

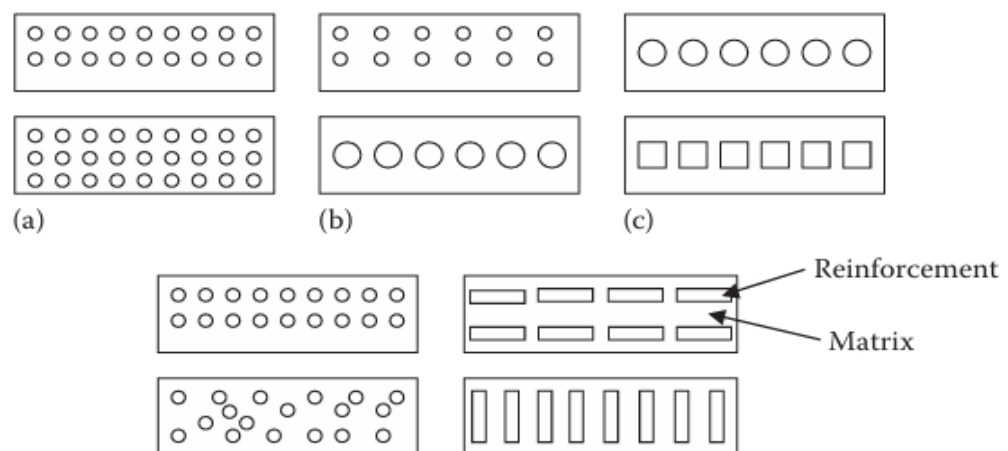


Figure I. 8 : Schéma des caractéristiques géométriques et spatiales des renforts dans les composites : (a) concentration, (b) taille, (c) forme, (d) distribution et (e) orientation.

$$W_r = \frac{\omega_r}{\omega_c} = \frac{r_r}{r_c} V_r \quad (1)$$

La proportion des constituants peut être exprimée soit par fraction massique (Wt %) soit par fraction volumique (Vt %). La fraction massique est pertinente pour la fabrication et la fraction volumique est couramment utilisée dans les calculs de propriétés (eq 1). Les fractions massique et volumique sont liées l'une à l'autre par la densité (ρ) eq(2).

$$W_m = \frac{\omega_m}{\omega_c} = \frac{r_r}{r_c} V_m \quad (2)$$

Où l'indice m fait référence à la matrice. r_c Peut être déterminé si les fractions volumiques ou massiques des constituants sont connues. Lorsque les fractions volumiques des constituants sont connues, alors équation (3) :

$$r_c = r_r V_r + r_m V_r \quad (3)$$

Lorsque les fractions massiques des constituants sont connues, alors :

$$\frac{1}{r_c} = \frac{W_r}{r_r} + \frac{W_m}{r_m} \quad (4)$$

L'équation (4) donne la densité du composite par la somme ajustée des densités des constituants selon la fraction de volume. Cette équation n'est pas seulement applicable à la densité mais, sous certaines conditions, peut être applicable à d'autres propriétés des composites. Une forme généralisée de l'équation (5) est :

$$X_c = X_r V_r + X_m V_m \quad (5)$$

Où X représente une propriété particulière, les indices c, r et m font référence au composite, au renforcement et à la matrice, respectivement [11].

Cette équation est connue sous le nom de règle des mélanges ou de loi des mélanges. La taille de la phase dispersée influence également les propriétés des composites. En général, plus la taille est petite, meilleures seront les propriétés mécaniques, en raison de l'effet de taille ; c'est-à-dire que la taille du défaut est limitée et elle doit être plus petite que la taille du matériau. La résistance de tout matériau est inversement proportionnelle à la taille du défaut.

La surface d'un matériau dépend de sa taille et de sa forme. Pour un volume particulier, le renforcement plus petit a une plus grande surface.

La surface de contact entre le renforcement et la matrice augmente avec la surface, ce qui entraîne de meilleures propriétés. Cependant, il est très difficile de produire des fibres continues avec des diamètres inférieurs à un micromètre. De très courtes fibres et particules ont tendance à s'agglomérer et il est très difficile d'obtenir une distribution uniforme.

Idéalement, un composite devrait être homogène, c'est-à-dire qu'il devrait avoir une distribution uniforme des constituants, mais cela est difficile à réaliser pendant la fabrication. L'homogénéité détermine la mesure dans laquelle un volume représentatif du matériau peut différer en propriétés physiques et mécaniques des propriétés moyennes du matériau.

Une distribution non uniforme doit être évitée autant que possible, sinon différentes régions d'un composite auront des propriétés différentes. Les propriétés régies par la partie la plus faible du composite seront réduites par la non-uniformité du système. Par exemple, la défaillance dans un composite non uniforme s'initiera dans la zone de résistance la plus faible, affectant ainsi défavorablement la résistance globale du composite.

L'orientation du renforcement dans une direction particulière au sein de la matrice affecte les propriétés isotropes du composite. Lorsque le renforcement est sous forme de particules équiaxes, le composite se comporte essentiellement comme un matériau isotrope. Lorsque les dimensions du renforcement sont inégales, le composite peut se comporter comme un matériau isotrope uniquement lorsque le renforcement est orienté de manière aléatoire. Par exemple, un FRC aléatoirement orienté et court aura des propriétés isotropes. Dans certains cas, le processus de fabrication peut induire une orientation du renforcement et donc une perte d'isotropie, c'est-à-dire que le composite est dit anisotrope comme dans le cas du moulage par injection.

Dans les composants fabriqués à partir de FRC continus, tels que les stratifiés unidirectionnels ou croisés, l'anisotropie peut être souhaitable car le stratifié peut-être agencer de manière à ce que la résistance maximale soit dans la direction de la contrainte de service maximale. En effet, un avantage majeur de ces composites est la capacité à contrôler l'anisotropie par la conception et la fabrication.

La plupart des propriétés d'un matériau composite sont une fonction complexe d'autres facteurs. Les constituants d'un composite interagissent généralement de manière synergique pour déterminer les propriétés des composites qui ne sont pas entièrement prises en compte par la règle des mélanges. Les caractéristiques chimiques et de liaison d'une interface sont particulièrement importantes pour déterminer les propriétés du composite. La résistance de

liaison interfaciale doit être suffisante pour le transfert de charge de la matrice vers les fibres, et ce n'est que dans ce cas que le composite aura une meilleure résistance que la matrice non renforcée. D'un autre côté, si la ténacité du composite est plus importante que la résistance, alors l'interface devrait échouer facilement pour permettre la mise en œuvre de mécanismes de durcissement tels que le décollement et le retrait des fibres. [11]

I.7 Application industrielle des matériaux composites :

Bien qu'encore peu généralisés face aux matériaux « classiques » disposant d'une avance historique en termes de savoir-faire et d'investissements au sein des usines de production, les composites prennent progressivement du poids dans les stratégies de différenciation et d'innovation industrielles. Devant répondre à des normes environnementales et de sécurité de plus en plus exigeante, les industriels cherchent à optimiser leur procédé de production par l'utilisation de nouveaux matériaux, tels que les matériaux composites.

Les composites trouvent aujourd'hui leurs principales applications dans le domaine des transports -l'aéronautique, l'automobile ou encore l'industrie ferroviaire – dans lesquels la légèreté des matériaux est synonyme d'économie de consommation d'énergie. Longtemps confinés à des pièces secondaires, les industriels privilégient de plus en plus l'utilisation des matériaux composites dans leurs procédés de production afin d'alléger sensiblement les pièces d'équipement sans impacter leur solidité ni leur performance.

Les constructeurs d'équipements sportifs ont eux aussi su tirer profit des matériaux composites pour améliorer les conditions d'utilisation et la praticité de leurs équipements. Tout en maintenant le caractère résistant et rigide des matériaux de sport, les composites permettent d'y associer d'autres propriétés spécifiques à l'utilisation du produit tels que la légèreté (plus de vitesse) ou la tenue aux conditions thermiques. Par exemple, la production de skis a été associée à des fibres de silice permettant de gagner en vitesse de glissement et en praticité.

Plus récemment, les composites jouent un rôle croissant dans le secteur des dispositifs médicaux (implants dentaires, prothèses...). Malgré des contraintes importantes en termes de biocompatibilité, nécessitant plusieurs contrôles et examens, le caractère allégeant des dispositifs médicaux représente une amélioration des conditions de vie pour les patients concernés. [12]

I.8 Matériaux utiliser dans les composites

Il existe plusieurs matériaux utiliser dans la fabrication des composites comme matrices ou renforçant (charge) et dans notre cas on a le plastique et le verre qui consiste notre composite.

I.8.1 Plastique (polyéthylène) :

I.8.1.1 Introduction :

Les polyoléfines, en particulier le polyéthylène et le polypropylène, sont considérées comme les polymères les plus couramment utilisés dans les plastiques [13]. Le polyéthylène (PE) est le polymère thermoplastique le plus courant au monde avec une variété d'applications [14]. Il a été découvert en 1933 par Reginald Gibson et Eric Fawcett. Il est connu depuis près de 90 ans, mais c'est toujours un sujet de recherche très parlé. Il s'agit du polymère de production le plus élevé au monde, et son marché représente plus de la moitié de la production mondiale de plastiques [15, 16].

I.8.1.2 Structure du polyéthylène :

Le polyéthylène est un matériau thermoplastique obtenu par polymérisation de l'éthylène (C_2H_4), conduisant à la formation de macromolécules constituées par la répétition du motif $-(CH_2)-$, comme illustré dans la figure (I.9)

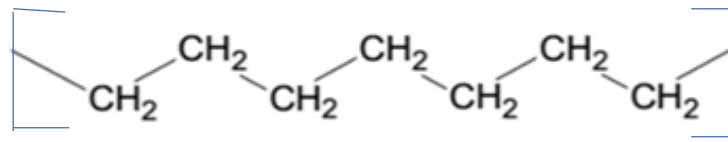


Figure I . 9 : Représentation semi-développée de la chaîne macromoléculaire du Polyéthylène [11].



Figure I . 10 : représentation physique de LDPE [12].

La structure du polyéthylène peut être expliquée à diverses échelles de Polymères (figure I.11), partant de la macromolécule pour arriver à l'échantillon macroscopique.

- L'échelle I, par lequel la structure moléculaire provient directement de la réaction de la synthèse du polymère.
- L'échelle II : se rapporte à la structure de conformation, c'est-à-dire la disposition spatiale des chaînes macromoléculaire.
- L'échelle III : liée aux phases amorphe et cristalline.
- L'échelle IV : c'est ce qu'on appelle une échelle microscopique, permettant la structure de phase amorphe et cristalline entre elles dans une forme sphérique.
- L'échelle V : représentant l'échantillon macroscopique.

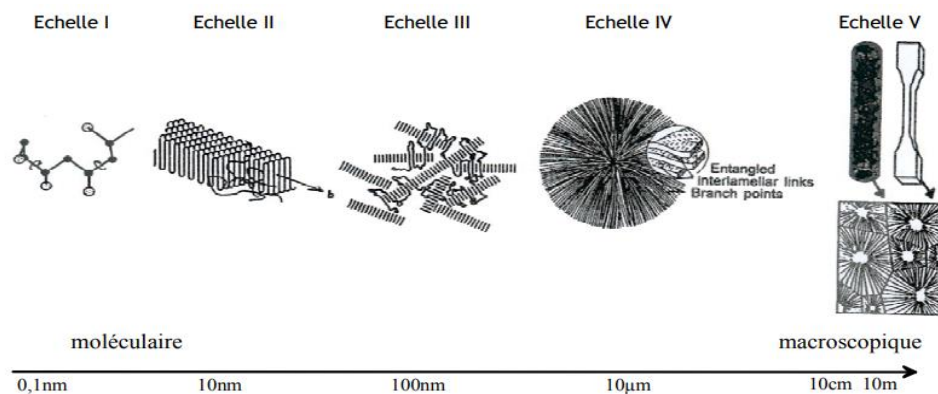


Figure I. 11 : Représentation des différentes échelles structurelles d'un matériau.

I.8.1.3 Synthèse et mise en forme du polyéthylène :

En 2000, la quantité de plastique synthétique était de 180 millions de tonnes. Le polyéthylène (PE) seul était un quart de cette production. En fait, ce polymère convient généralement aux formats simples (extrusion, injection), a d'excellentes propriétés de l'isolation électrique et de la résistance à l'impact, et a une inertie chimique et biologique à grande échelle (adaptée au contact alimentaire). Bien que PE soit recyclable de manière thermomécanique, la fin de la durée de vie de la plupart des objets PE en production reste principalement dirigée vers la bravoure thermique [17]

En 1933, Compagnie I.C.I., E. à l'Institut de recherche Fawcett et R. Gibson ont découvert une procédure de production de polyéthylène à base de la polymérisation radicale de l'éthylène à haute pression qui a provoqué des chaînes de ramification [18]. La première synthèse industrielle de ce matériel a été réalisée en 1939 par la même entreprise. Ce processus est basé

sur la polymérisation radicale de l'éthylène à haute pression, qui produit des chaînes ramifiées. Cette réaction fait référence à la combinaison de l'éthylène et de ses différents types de

Co- monomanes (comme l'acétate de vinyle, les esters acryliques). Après avoir utilisé Co- monomanes, le matériau capture certaines propriétés telles que : cela préserve le copolymère ou le ter polymère statistique. L'architecture polymère irrégulière résultant de cette approche rend difficile la cristallisation des matériaux qui produisent du polyéthylène à faible densité (PEBD) (figure 16.A).

Dans les années 1950, un autre type de synthèse de polyéthylène est apparu : la polymérisation ionique catalytique. De nombreuses sociétés pétrochimiques ont déposé des brevets sur une variété de catalyseurs.

En 1953, Ziegler a travaillé avec Natta sur des catalyseurs complexes $TiCl_4 - AlR_3$ (AlR_3 étant suffisant, par exemple $Al(C_2H_5)_3$) et ce système a été utilisé en 1955 pour la première production à grande échelle de polyéthylène de haute densité (PEHD).

Ce matériau est obtenu par la polymérisation sous basse pression des monomères d'éthylène en utilisant le catalyseur $TiCl_4 - AlR_3$ de manière stéréo spécifiée. Les chaînes formées de cette manière sont plus linéaires et comportent peu de ramifications, ce qui accroît leur cristallinité (figure 16.B). D'autres systèmes à basse pression, comme le procédé Phillips ou le procédé Standard Oil, utilisent des catalyseurs à base d'oxyde de chrome ou de molybdène.

À l'époque, la synthèse de haute et basse pression était le synthon PEBD ou PEHD. Cependant, en 1979, CDF Chemical a développé une méthode de production de PEHD à haute pression en utilisant le catalyseur Ziegler Natta.

En 1980, la même entreprise a établi différents types de polyéthylène suivant le même processus :

Polymères linéaires contenant des effets courts obtenus par copolymérisation de l'éthylène avec des alpha oléfines (propylène, butène, octène, etc.). Ce matériau est appelé polyéthylène à faible densité linéaire (PEBDL) (figure 16.C).

Dans les années 1990, un nouveau catalyseur pour Dow et Exxon, le Metallocènes, a été développé. Ces complexes organométalliques de catalyseurs, de zirconium (ZR) ou de titane (Ti), sont associés à des méthylaluminoxane, permettant un meilleur contrôle sur la distribution

du poids moléculaire, la dispersion des Co-monomères le long de la chaîne et le degré de connexion en polyéthylène (figure 16.D).

Contrairement au catalyseur de Ziegler-Natta, ils présentent un centre actif unique avec des propriétés stéréo et électroniques bien définies, ce qui la facilite et conduit à une introduction à la polymérisation. Ce processus crée une zone élargie de polyéthylène. Cela va des matériaux de densité moyenne (PEMD) à une densité de matériaux à haute densité (PEHD).

Grâce à ces progrès, le polyéthylène répond aux exigences techniques strictes et permet la production de haute technologie (comme les tuyaux pour les réservoirs à gaz ou à gaz tels que les véhicules de chaleur et de rayonnement pour une forte pression et des fissures). Deux autres types de polyéthylène ont été développés : un faible poids moléculaire

Polyéthylène (LMWPE) et vice versa. Les architectures de polymère de différents types de polyéthylène affectent les propriétés du matériau dans son état fondu (rhéologique). Cela affecte le processus de formatage et les propriétés mécaniques du produit final.

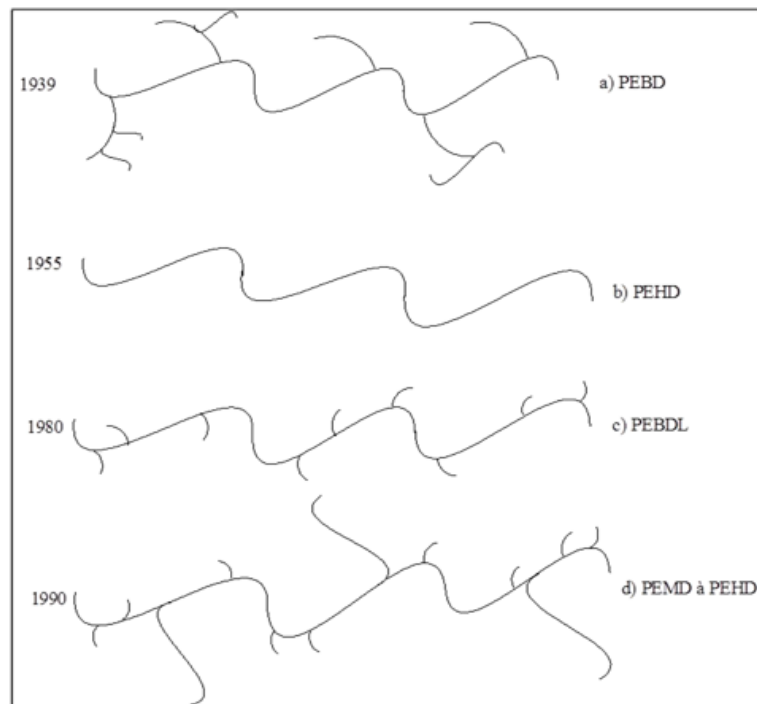


Figure I . 12 : Evolution du mode de synthèse du polyéthylène [13].

Diverses classes de polyéthylène sont mises en œuvre par des techniques classiques. L'extrusion est utilisée pour fabriquer de longs produits avec une pression, une fusion et un pompage. Divers dispositifs post-Ejection sont utilisés en fonction de la géométrie souhaitée :

Profils extrêmes (plaques, cils, tubes ou fils), collations extrudées (films), soufflage extrudé (corps creux). Le polyéthylène est également transformé par injection (partie de la forme) ou par formation de compression (panneau). La capacité rhéologique à mettre en œuvre :

Est un critère essentiel pour sélectionner des techniques de conversion. Les contrôles les plus courants de l'industrie sont les mesures de l'indice de liquidité (IF) ou de « l'indice de fusion ». Cela correspond à l'écoulement de matériau en grammes par des capillaires (dimensions standardisées) en dessous de 190 ° C sur une charge de 2,16 kg pendant 10 min. Ce paramètre dépend de la longueur et de l'effet de la chaîne. Ce test est souvent complété par la détermination de la courbe de viscosité. La viscosité exprimée en Pa.s est le rapport de la tension au taux de déformation ($\eta = \tau / \dot{\gamma}$) d'une notation particulière. Les deux zones se distinguent.

- Domaine Newtonien avec des ciseaux bas.
- Domaine non Newtonien avec de gros ciseaux.
- Viscosité non-nouvelle de l'indice de flux et l'étendue de l'influence du polyéthylène, telles que l'utilisation d'extrudeurs [17]

I.8.1.4 Types de polyéthylène :

Il existe de nombreux types de polyéthylènes qui sont classés en fonction de la densité, qui dépend du nombre et de la durée d'influence sur les chaînes moléculaires.

Parmi ceux-ci :

- ❖ PE-BD : polyéthylène basse densité, en anglais LDPE, (low-density polyethylene) : il possède un nombre de ramifications plus élevé que le PE-HD, ce qui se traduit par une structure moléculaire moins compacte et un taux de cristallinité plus faible.
- ❖ PE-BDL : polyéthylène à basse densité linéaire, en anglais LLDPE, (linear low-density polyethylene).
- ❖ PE-HD : polyéthylène haute densité, en anglais HDPE, (high-density polyethylene) : il présente peu de ramifications, ce qui le rend plus rigide et moins perméable que le PE-BD.
- ❖ PE-UHPM : polyéthylène à masse molaire très élevée, en anglais UHMWPE, (ultrahigh molecular weight polyethylene).
- ❖ PE-R : polyéthylène réticulé, en anglais PEX, (cross-linked polyethylene) : il s'agit d'une forme de polyéthylène basse densité dans laquelle les chaînes moléculaires individuelles sont liées entre elles pour former un polymère en réseau tridimensionnel, bien que ces réseaux soient beaucoup moins denses que ceux des résines époxydes, par exemple. Par rapport au PE-BD, ce sont principalement les propriétés thermomécaniques qui sont

améliorées, et le matériau présente une structure chimique différente de celle du PE-BD [19]

- ❖ PE-RHD : polyéthylène réticulé à haute densité, en anglais HDXLPE, (high-density crosslinked polyethylene).
- ❖ PE-MD : polyéthylène à moyenne densité, en anglais MDPE, (medium-density polyethylene).
- ❖
- ❖ PE-TBD : polyéthylène à très basse densité, en anglais VLDPE, (very low-density polyethylene) [20]

 PET	 HDPE	 PVC	 LDPE	 PP	 PS	 OTHER
POLYETHYLENE TEREPHTHALATE	HIGH-DENSITY POLYETHYLENE	POLYVINYL CHLORIDE	LOW-DENSITY POLYETHYLENE	POLYPROPYLENE	POLYSTYRENE	OTHER
WATER BOTTLES; JARS; CAPS	SHAMPOO BOTTLES; GROCEY BAGS	CLEANING PRODUCTS; SHEETINGS	BREAD BAGS; PLASTIC FILMS	YOGURT CUPS; STRAWS; HANGERS	TAKE-AWAY AND HARD PACKAGING; TOYS	BABY BOTTLES; NYLON; CDS
						

Figure I. 13 : Les types de polyéthylène.

I.8.1.5 Propriétés du polyéthylène :

Le polyéthylène a de nombreuses propriétés avantageuses, comme une excellente flexibilité et une conversion simple. Il a également une excellente résistance aux acides (dilution et concentration), alcools, bases, esters et bonne résistance à l'impact et stabilité dimensionnelle[21].

Les taux de cristallinité en polyéthylène varient en fonction du type de polymérisation. Plus les branches de polyéthylène, plus elles seront cristallisées, car l'effet empêchera le réarrangement moléculaire. En raison de leur cristallinité, les polyoléfines sont vides, épaisses et semblent transparentes sous la forme de films. Les propriétés mécaniques de polyoléfines dépendent de leur masse molaire.

À température ambiante, le PEBD (polyéthylène à faible densité) est flexible, mais est plus sensible aux nageoires que le PEHD (polyéthylène à haute densité). Ce dernier a un module élastique plus élevé que le PEBD, mais est une extension de la rupture inférieure.

De plus, le polyéthylène est très sensible à la direction :

Lorsque le matériau accède dans cette direction, les propriétés mécaniques sont meilleures. Cependant, le traitement des étalons réduit la cristallinité et améliore la résistance, mais est extrêmement sensible au choc. De plus, le polyéthylène a une excellente stabilité chimique. Ils résistent aux acides (à l'exclusion des oxydants), aux bases et aux sels. Ils sont également insolubles même hydrophobes et moins perméables au solvant.

en présence d'air. Ce problème peut être affaibli par les traitements microscopiques tels que l'ajout de noir de carbone, ce qui fait que le matériau est noir.

Le polyéthylène est également un excellent matériau d'isolation électrique. Cela signifie qu'il est utile pour la production d'isolation du câble et de câbles. En général, ils ont du polyéthylène cristallin et ont une séparation significative dans la mousse [22]

Quelques propriétés de LDPE sont citées dans le tableau (I.1) suivant :

Tableau I. 2 : résume les avantages et les inconvénients.

Propriété	Polyéthylène basse densité (LDPE)
Densité (g/cm ³)	0,94 – 0,91
Température de fusion (C)	115 – 105
Transparence	Semi – transparent
Résistance à la traction (MPa)	25 -8
Allongement à la rupture (%)	650 – 100
Rigidité	Souple
Résistance chimique	Bonne (sauf agents oxydante forts)
Résistance aux chocs	Excellente
Conductivité thermique (W/m.K)	0,33
Recyclabilité	Oui (facilement recyclable)
Dégradabilité	Très faible (non biodégradable)

I.8.1.6 Applications du polyéthylène :

En raison de ses faibles coûts de fabrication et de ses excellentes propriétés physiques et mécaniques, le polyéthylène est peut-être le polymère le plus fréquemment utilisé [18].

PEBD (polyéthylène à faible densité) Les utilisations principales sont des préoccupations concernant les produits flexibles :

Serres agricoles, sacs poubelles, conteneurs flexibles, jouets, etc. Produit.

Le polyéthylène réticulé peut être utilisé comme revêtements sur les conifères, les pneus ferroviaires, les dispositifs médicaux, les pipelines industriels, les adhésifs, les composants électroniques ou pour la synthèse de résines d'échange d'ions particulièrement et d'hydrogels sensibles au stimulus [23] .

I.8.1.7 Recyclage et la dégradation du polyéthylène :

Avec une sensibilisation croissante aux problèmes environnementaux, les plastiques sont devenus la cible de critiques non débilantes. Le recyclage de ces plastiques, visant à réduire les déchets, n'affecte les déchets de polymère qu'entre 25 et 30 ° C, mais est une alternative. Les déchets plastiques restants sont incinérés ou enterrés. La grande quantité de plastique disponible dans le flux de déchets a conduit à des tendances accélérées dans la production et le développement de plastiques démantelés [24] .

En raison de son utilisation à grande échelle, le polyéthylène provoque de graves problèmes environnementaux et le démantèlement ou les problèmes de recyclage. Dans le désert, il existe des bactéries qui peuvent exacerber les polymères du polyéthylène, mais cela ne peut être fait qu'en attaquant l'extrémité du polymère.

Pour les sacs en plastique une solution possible consiste à intégrer la copolymérisation dans les chaînes polymères à travers les bactéries (par exemple, les segments de la chaîne d'amidon). Cela permet au polymère de se décomposer en sous-unités plus petites et de le retirer plus rapidement. En ce qui concerne le recyclage, tous les processus de polyoléfine sont généralement similaires. Après la consommation, le plastique est initialement soumis à un contrôle de qualité puis nettoyé pour éliminer les impuretés. Ils sont ensuite broyés, séchés et convertis en granulés et flocons. Par conséquent, ce dernier devient la matière première de la production de nouveaux produits [22]



Figure I. 14 : logo de recyclage du polyéthylène a base densité [20].

I.8.1.8 Additifs au recyclage :

De nombreux additifs se trouvent dans la composition finale des plastiques, l'amélioration des propriétés et l'adaptation plus précisément après leur utilisation. Ces adjuvants ont des rôles spécifiques de différents types et dépendent de la quantité intégrée.

Les polymères "purs" sont fragiles et peuvent se détériorer sous les effets de différentes sources (chaleur, humidité, lumière, etc.), entraînant des changements dans leur structure chimique, entraînant des changements dans les propriétés physiques et mécaniques.

Par conséquent, vous ne pouvez pas les utiliser tels quels. Pendant la production, le fabricant ajoute une variété de substances qui changent et améliorent ses propriétés :

a. Antioxydants :

Ils empêchent les polymères de réagir en présence de l'oxygène de l'air. Certaines molécules d'antioxydants sont fixées à un endroit de la chaîne polymère, tandis que d'autres circulent dans la phase amorphe.

b. Agents de réticulation :

Après une réaction chimique, ils peuvent se lier aux chaînes de polymères pour former des ponts intermoléculaires. Ces agents permettent la création d'un réseau macromoléculaire, qui confère au matériau une meilleure stabilité mécanique et thermique [25].

c. Autres additifs :

Ce qui comprend :

- Les peroxydes : sont des composés chimiques, organiques ou inorganiques, caractérisés par leurs propriétés oxydantes et comburantes, ainsi que par une grande instabilité. Leurs propriétés sont principalement dues à la présence de deux atomes d'oxygène voisins liés entre eux

(-O-O-) formant le groupement « peroxy ». Cette structure rend les peroxydes à la fois utiles et dangereux. Ils sont capables de générer des radicaux libres pour initier des réactions chimiques radicalaires (polymérisation, oxydation, réticulation, etc.) de manière contrôlée, mais sont également très instables et sujets à une décomposition rapide et explosive. Leur structure générale est ROOR', où R et R' sont des groupements organiques.

- Le soufre : est connu depuis l'Antiquité. Son nom vient du latin *"Sulpur"*, signifiant "soufre", de symbole S et de numéro atomique 16. Le soufre est un minéral non métallique de couleur jaune, très répandu dans la nature, notamment dans les régions volcaniques, sous forme de sulfates ou de sulfures [26]. La forme la plus stable à l'état solide, dans des conditions normales de température, est le soufre alpha (S α), de formule S₈, appelé cyclooctasoufre [27].

- D'autres substances peuvent également être ajoutées, comme des plastifiants, des colorants, des charges, des ignifugeants, etc., en fonction des propriétés souhaitées [25].

I.8.2 Verre

I.8.2.1 Définition de verre

L'usage linguistique général du mot verre a changé au fil des siècles. Des différences se trouvent même dans la littérature scientifique, mais celles-ci reposent davantage sur différentes façons de considérer les choses. Parmi ce matériel considérable, seules quelques extraits typiques seront mentionnés. Par exemple, l'un des pionniers de la recherche sur le verre, [28], commence son livre, *Der Glaszustand* (L'état vitreux), avec cette phrase : (Dans l'état vitreux, il existe des matériaux solides et non cristallisés). Cette définition, cependant, est trop générale, car, selon elle, le gel de silice, par exemple, serait un verre. De nombreuses autres définitions tendent à mettre l'accent sur le comportement de viscosité.

Ces définitions ne limitent pas la composition du verre. Un autre groupe de définitions provient d'auteurs plus proches de la technologie. À titre d'exemple, la définition de 1945 de l'American Society for Testing and Materials peut être mentionnée : (Le verre est un produit inorganique de fusion qui a été refroidi à un état rigide sans cristallisation). Cela a été accepté dans la norme allemande [29], mentionnée au début, comme suit : "Le verre est un produit de fusion inorganique qui se solidifie essentiellement sans cristallisation."

Encore plus justement, appelle ce phénomène le processus de congélation. Si nous voulons encore caractériser l'intention de la définition, alors nous avons :(Dans le sens physico-chimique, le verre est un liquide sous-refroidi gelé). [30]

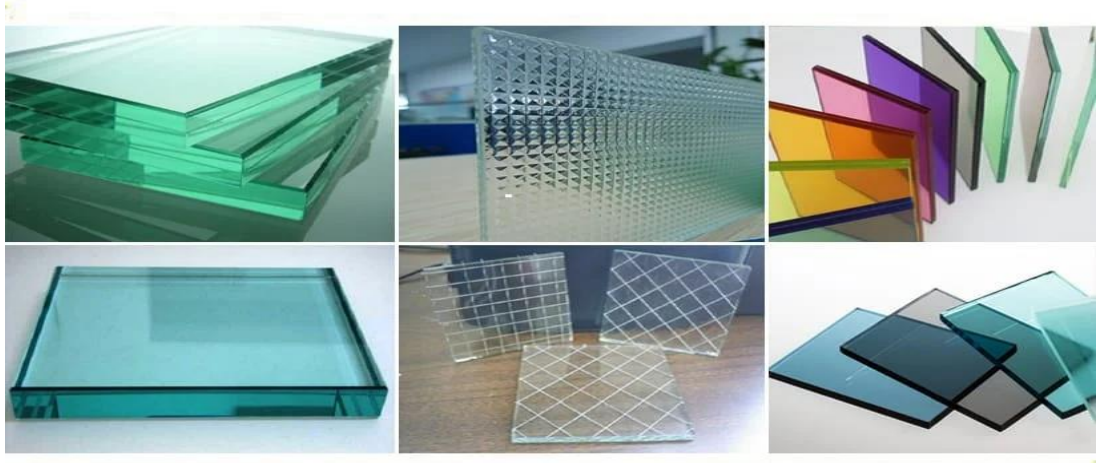


Figure I. 15 : différents types de verre.

I.8.2.2 Types de verre

Il existe plusieurs types de verre, chacun ayant des propriétés chimiques, physiques et thermiques spécifiques qui le rendent adapté à des usages particuliers. Voici une classification des principaux types de verre :

- **Verre sodocalcique (verre à vitre) :**

Composition : Silice (SiO_2), soude (Na_2O), chaux (CaO)

Utilisation : Vitres de fenêtres, bouteilles, vaisselle, flacons.

Avantages : Bon marché, facile à fondre, transparent.

- **Verre borosilicaté :**

Composition : Silice + Bore (B_2O_3)

Exemples : Pyrex

Utilisation : Matériel de laboratoire, vaisselle résistante à la chaleur, éclairage.

Avantages : Résistant aux chocs thermiques et chimiques.

- **Verre au plomb (cristal) :**

Composition : Silice + Oxyde de plomb (PbO)

Utilisation : Verrerie décorative, objets de luxe, verres de table.

Avantages : Brillance élevée, bon pouvoir réfringent.

- **Verre trempé :**

Type de traitement : Verre sodocalcique soumis à un traitement thermique.

Utilisation : Vitrage de sécurité, pare-brise, cabines de douche.

Avantages : Très résistant aux chocs mécaniques, se brise en petits morceaux non coupants.

- **Verre feuilleté :**

Structure : Plusieurs couches de verre avec film plastique (PVB).

Utilisation : Pare-brise, vitre anti-effraction.

Avantages : Sécurité accrue, les morceaux restent collés au film après cassure.

- **Verre mousse (verre cellulaire) :**

Caractéristiques : Léger, isolant, opaque.

Utilisation : Isolation thermique et acoustique dans le bâtiment.

Avantages : Résistant au feu, à l'eau et aux produits chimiques.

- **Verre optique :**

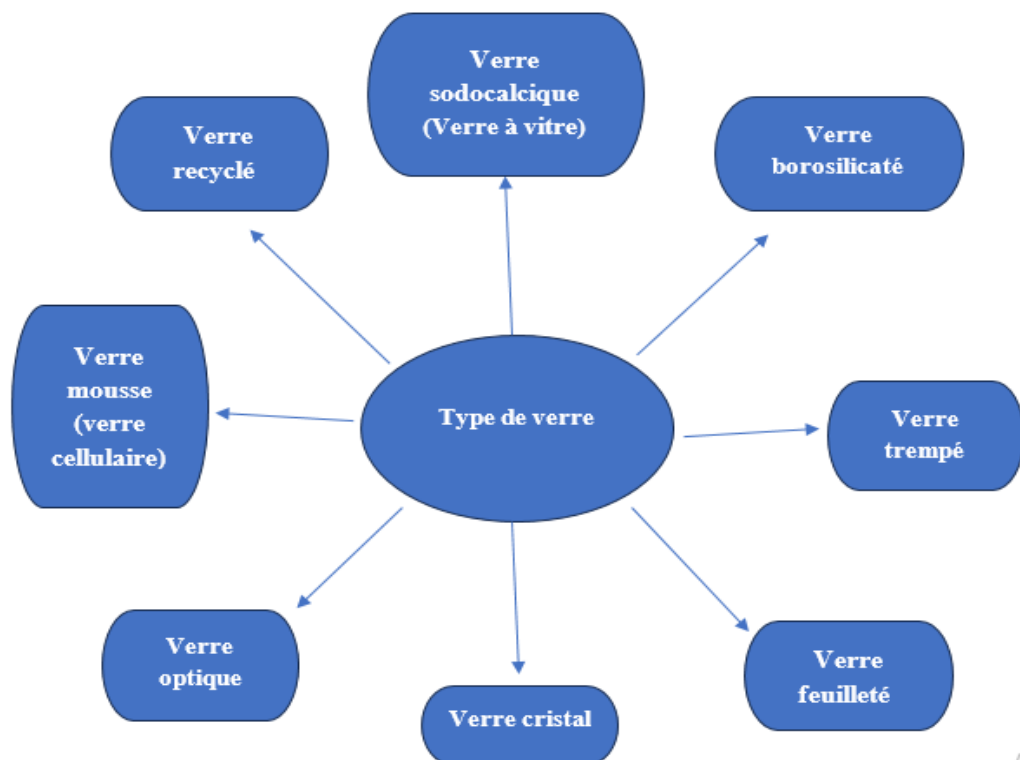
Utilisation : Lentilles, microscopes, caméras, télescopes.

Caractéristiques : Pureté élevée, propriétés optiques précises.

- **Verre recyclé :**

Provenance : Bouteilles, fenêtres, verre cassé.

Utilisation : Fabrication de nouveaux contenants, matériaux composites, pavés de construction.



A

Figure I. 16 : les types de verre

I.8.2.3 Propriétés de verre

A. Viscosité

La viscosité n'est pas seulement une propriété essentielle pour la production et la fabrication des verres elle est également étroitement liée à la nature et à la structure de la fusion du verre.

Certains articles de manuels traitant de la viscosité se trouvent dans le volume 3 de la série de livres éditée .[31]

Tableau I. 3 : Valeurs de viscosité, calculées en utilisant l'équation VFT, du verre à thermomètre Jena 16 III (η en dPa s).

$T(^{\circ}\text{C})$	$\log \eta$
(550)	(13.30)
600	10.92
700	7.93
(715)	(7.60)
800	6.11
900	4.88
1,000	4.00
1,100	3.34
1,200	2.82
1,300	2.40
1,400	2.06

L'équation (6) de VFT :
$$\log \eta = A + \frac{B}{T - T_0} \quad (6)$$

$$A = -1,386 \quad B = 3830,3 \quad T_0 = 288,8$$

La courbe de viscosité-température du verre est ainsi représentée par l'équation (7).

$$\log \eta = -1,386 + \frac{3830,3}{T - 288,8} \quad (7)$$

A. Expansion thermique

Lors de la fusion du verre, la viscosité est l'une des propriétés décisives. Dans le processus de production, le recuit suit la fusion et la mise en forme ; une autre propriété devient alors importante, qui a déjà été impliquée dans la détermination de la température de transformation : **l'expansion thermique**. Pour cette raison, ce sera la propriété discutée ensuite.

Chaque particule d'une substance vibre, en raison de l'énergie thermique toujours présente. Avec l'augmentation de la température, l'énergie thermique devient plus grande, ce qui entraîne une augmentation de l'amplitude de vibration.

Deux atomes liés par des forces (anharmoniques) augmentent ainsi leur distance de séparation, c'est-à-dire qu'avec l'augmentation de la température, une expansion se produit. Dans le solide, les vibrations sont limitées par la structure rigide, ce qui est moins le cas dans le liquide, c'est-à-dire que les fondants ont une plus grande expansion thermique. Une observation correspondante peut être attendue lors de la transition du verre au fondant. Il est en fait généralement vrai que l'expansion devient alors plus grande d'un facteur d'environ 3.

L'expansion thermique est caractérisée par le coefficient linéaire moyen d'expansion α ou le coefficient volumique moyen d'expansion β (coefficient cubique d'expansion) équation (8)

et (9) :

$$\alpha_{\Delta T} = \left(\frac{1}{l_0}\right) \left(\frac{\Delta l}{\Delta T}\right) \quad (8)$$

Ou

$$\beta_{\Delta T} = \left(\frac{1}{v_0}\right) \left(\frac{\Delta v}{\Delta T}\right) \quad (9)$$

Dans lequel Δl ou Δv représente les changements de longueur ou de volume qui résultent d'un changement de température ΔT . En général, $\beta \approx 3\alpha$. [32]

B. Densité

Même si la densité du verre n'a pas une grande importance pratique pour son utilisation, il est approprié pour plusieurs raisons de l'aborder comme la prochaine propriété, car ses valeurs sont souvent nécessaires pour le calcul d'autres propriétés. De plus, la constance de la composition d'un verre peut être vérifiée de manière simple par des mesures de densité. Aux fins de définition, la densité ρ est la masse par unité de volume.

L'unité de base officielle SI (Système international d'unités) pour cela est kg/m³ ; cependant, on trouve généralement des données exprimées dans l'unité dérivée g/cm³ (= 10⁻³ kg/m³), qui sera également utilisée ici.

Il existe une méthode de mesure qui peut être appliquée principalement comme méthode relative, de sorte qu'un verre standard avec une densité similaire mais connue soit ajouté. Ensuite, la densité ρ_x recherchée peut être déterminée en utilisant (10)

$$\rho_x = \rho_s - 0,00171(Tx - Ts) \quad (10)$$

Dans laquelle ρ_s est la densité du verre standard, Tx est la température mesurée du verre en cours d'examen, et Ts est la température mesurée de la pièce standard.

Cette méthode permet de déterminer la densité jusqu'au quatrième chiffre après la virgule. Muschik a varié cette méthode en effectuant le changement de densité du liquide par des variations de sa composition. De cette manière, il peut titrer la densité d'un verre borosilicate par l'ajout de méthanol au tétrabromométhane. [33].

C. Propriétés optiques

Entre la densité et l'indice de réfraction, il existe un lien étroit déterminé par la structure, c'est pourquoi cette propriété, ainsi que d'autres propriétés optiques, suivra dans le chapitre suivant. Ce thème est exploré plus en profondeur [34].

À partir de la discussion précédente, les méthodes de mesure les plus importantes s'en suivent facilement. La plus précise est la mesure de la déviation d'un rayon lumineux dans un prisme avec un angle φ , formé par deux plans, d'environ 60° (voir Fig. 4).

Ensuite, avec un chemin symétrique des rayons, cette équation (11) est valable :

$$n = \frac{\sin[(\delta + \varphi)/2]}{\sin(\frac{\varphi}{2})} \quad (11)$$

Avec cette méthode, il est possible d'atteindre une précision dans quelques unités du sixième chiffre décimal.

La réflexion totale est utilisée avec le réfractomètre.

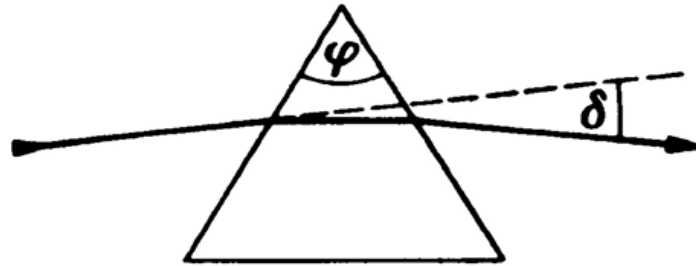


Figure I. 17 : Trajectoire du rayon pour la méthode du prisme de détermination de l'indice de réfraction.

D. Propriétés Mécaniques

Les propriétés mécaniques du verre, en mettant l'accent sur sa résistance, appartiennent à ces propriétés du verre auxquelles la recherche a été particulièrement consacrée et dans lesquelles des progrès remarquables ont été réalisés. À ce sujet, il existe un grand nombre d'enquêtes et de publications. Dans une bibliographie de la Commission internationale du verre [35], 665 travaux ont été cités qui avaient été publiés jusqu'en 1965, et peu après, [36] a résumé l'état du domaine dans une monographie. Plusieurs articles récents de manuels sur différentes branches du domaine peuvent être trouvés dans le volume 5, "Élasticité et résistance des verres," de la série de livres éditée [31].

En détail pour diverses propriétés mécaniques telles que les propriétés élastiques, la résistance, les contraintes et la dureté.

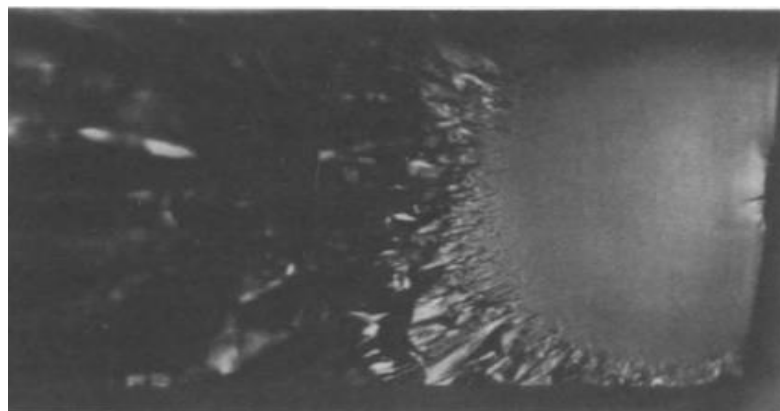


Figure I. 18 : Surface de fracture d'une plaque de verre plate avec miroir de fracture et moucheté fin et grossier ainsi que moucheté de vitesse (branchements de fissures), de Kerckhof (épaisseur de la plaque : 6,2 mm).

E. Propriétés électriques

Les nombreuses et diverses applications du verre incluent également l'électronique. En général, les propriétés électriques du verre à des températures normales sont déterminantes, tandis que, par exemple, pour la fusion électrique du verre, celles à des températures plus élevées sont importantes.

Il existe de nombreuses présentations complètes des propriétés électriques du verre, dont seules celles [37],[38] et [39], ainsi qu'une bibliographie de la Commission Internationale du Verre pour les années 1967 à 1976 [40] seront mentionnées. Quelques études sur des éléments séparés seront mentionnées lorsque pertinent. Une substance est électriquement conductrice lorsque, en son sein, des électrons ou des ions libres mobiles permettent le transport de courant. Cette propriété est caractérisée par la conductivité électrique spécifique κ (parfois les symboles σ ou λ sont également utilisés), qui représente la conductivité d'un corps cylindrique ayant une section transversale de 1 cm^2 et une longueur de 1 cm . La valeur réciproque de κ est la résistance électrique spécifique ρ . L'unité de ρ est $\Omega\text{ cm}$, tandis que celle de κ est $\text{S/cm} = \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ (avec Ω = ohms et $\text{S} = 1/\Omega$ = siemens).

Avec les unités SI internationales, la longueur est basée sur 1 m, de sorte que les valeurs diffèrent par un facteur de 100 ou 0,01. La structure des verres consiste en un réseau dans lequel les cations modificateurs de réseau sont positionnés. Puisque ceux-ci que les verres possèdent une légère conductivité électrique.

F. Tension superficielle

La tension de surface des verres joue un rôle important durant la fusion du verre et à différentes étapes de la fabrication, comme le souligne également [41] avec plusieurs exemples. Une particule à l'intérieur d'une substance est attirée par toutes les particules adjacentes, de sorte que la force résultante devient nulle. En revanche, si une particule est à la surface, les forces d'attraction manquent d'un côté, et une force orientée vers l'intérieur en résulte. Pour amener une particule de l'intérieur à la surface, un certain travail est dépensé. Les substances ayant une grande surface ont donc plus d'énergie ainsi que la tendance à occuper un état de plus basse énergie en réduisant la surface. Les liquides prennent donc une forme sphérique si cela est possible, car cette forme offre le rapport surface/volume le plus faible. L'augmentation d'une surface présuppose le transport de particules de l'intérieur vers la surface et nécessite donc un apport d'énergie.

L'énergie nécessaire pour former une nouvelle surface de 1 m^2 est appelée l'énergie libre spécifique de surface. Son unité est de J/m^2 . Cependant, en général, le terme tension de surface σ (mesurée en N/m) est plus courant. (Dans les travaux antérieurs, les valeurs sont données en erg/cm^2 ou en dyn/cm . La conversion des termes se déroule ainsi :

$$1 \text{ erg/cm}^2 = 1 \text{ dyn/cm} = 10^{-3} \text{ J/m}^2 = 10^{-3} \text{ N/m} = 1 \text{ mN/m.})$$

Puisque dans cette discussion les tensions de surface interfaciales sont souvent impliquées, le symbole le plus courant pour cela γ a été choisi. Les unités de γ et σ cependant, sont les mêmes. La diminution de l'énergie de surface peut se produire non seulement physiquement, par un changement de la forme de la surface ; une influence chimique peut également avoir lieu, de sorte que les particules qui sont liées vers l'intérieur avec le moins d'énergie se regroupent à la surface. Cela définit le point de départ.

G. Résistance chimique

En plus de sa transparence à la lumière, le verre se distingue également, parmi d'autres propriétés, par sa grande résistance par rapport à presque tous les produits chimiques à des températures habituelles. Sans cette propriété, la large gamme d'applications du verre serait impensable. Parmi les réactifs les mieux connus, seul l'acide hydrofluorique provoque une attaque immédiatement perceptible sur le verre ; il met en solution les composants principaux du verre selon cette formule (12) :



En pratique, cependant, l'attaque par HF est quelque peu plus compliquée ; elle est généralement influencée par le fait que les produits de réaction se déposent à la surface et peuvent ainsi influencer le processus de gravure au fur et à mesure. Les conditions expérimentales et la composition du verre déterminent si une gravure claire ou mate est obtenue. Suire a contrasté les processus essentiels impliqués. Dans des conditions expérimentales peu perturbées[42], selon [43], la vitesse de dissolution de la silice vitreuse dans de l'acide HF à 49 % à température ambiante est de $3 \times 10^{-4} \text{ g/(cm}^2 \text{ min)}$. Des solutions d'HF plus fortement diluées donnent des valeurs inférieures, tandis que des températures croissantes les augmentent avec une énergie d'activation d'environ 30 kJ/mole. Ces dernières valeurs ont également été trouvées dans des expériences avec du quartz, bien que, il est vrai, les vitesses de dissolution aient été en moyenne seulement moitié moins élevées qu'avec la silice vitreuse.

Le comportement du verre par rapport à l'eau et aux solutions aqueuses s'est révélé être multifacette. Il est intéressant, au passage, que la résistance chimique du verre ait joué un rôle important dans l'histoire des sciences naturelles, comme le précise [44] et, plus tard, [45]. Ainsi, Boyle a rapporté en 1666 que lorsque l'eau est distillée dans un récipient en verre, une poudre blanche apparaît et que la distillation peut souvent être répétée sans que le liquide ne se lasse de produire la terre blanche. Boyle en conclut que l'eau pouvait être presque complètement convertie en terre, ce qui était vu comme une preuve que les quatre éléments de base, le feu, l'eau, l'air et la terre, pouvaient être transformés les uns dans les autres. Ce n'est qu'environ 100 ans plus tard que Lavoisier et, peu après, Scheele fournit des preuves que la terre qui se formait ainsi correspondait à la perte de poids du récipient en verre ; ainsi, les scientifiques découvrirent pour la première fois que le verre n'est pas insensible à l'eau.

Néanmoins, la résistance généralement observée des verres vis-à-vis des solutions aqueuses n'est qu'apparente, car le verre en général n'est pas stable par rapport aux solutions aqueuses ; des réactions se produisent dans chaque instance. En général, cependant, les taux de réaction sont si faibles que les verres s'avèrent pratiquement résistants. Cela est prouvé non seulement par l'apparence de plusieurs verres égyptiens et romains de plusieurs millénaires dans les musées, mais aussi principalement par l'état des verres naturels comme les obsidiennes, Les perlites ou les tectites, qui peuvent être des ordres de grandeur plus anciens.

Les investigations de leur comportement, par exemple, [46], sont évoquées comme des analogies afin de pouvoir mieux estimer le comportement dans le temps de certains types de verre, un processus qui, il est vrai, a ses limites, comme le démontrent [47]. La recherche sur la résistance chimique des verres a prouvé que les processus sont très complexes [48]. Dans le cadre du présent volume, seuls les points essentiels peuvent être explorés. Des informations plus approfondies se trouvent, par exemple, dans les monographies [49], [50] et [51], ainsi que dans des articles de synthèse [52], [53] et [54]. Une bibliographie de la Commission Internationale du Verre [55] cite presque 1 000 travaux jusqu'en 1972 qui concernent des questions liées à la résistance chimique du verre.

H. Propriétés thermiques

La production de verre est un processus très intensif en chaleur, de sorte que les propriétés thermiques jouent un grand rôle. De plus, pour l'élucidation de la nature du verre, la connaissance de la chaleur spécifique et du transfert de chaleur est particulièrement cruciale.

Voici quelques propriétés de verre dans le tableau (I.2) suivant :

Tableau I. 4 : les propriétés de verre.

Propriété	Verre
Densité (g/cm ³)	2,4 – 2,6
Température de fusion (C°)	1400
Transparence	Très bonne
Résistance à la traction (MPa)	40 – 100 (mais fragile)
Allongement à la rupture (%)	1>
Rigidité	Très rigide
Résistance chimique	Bonne (acides, bases)
Résistance aux chocs	Faible (cassant)
Conductivité thermique (W/m.K)	1,0- 0,8
Recyclabilité	Oui (mais plus difficile)
Dégradabilité	Très faible

I.9 Recyclage

I.9.1 Notions sur le recyclage

Le "recyclage" consiste à créer de nouveaux matériaux ou à régénérer les matériaux d'origine grâce à l'élimination des déchets (cela comprend le recyclage organique, mais exclut le cycle d'énergie). Le recyclage des produits de vie finale est basé sur un réseau spécial qui permet aux entreprises et aux particuliers de retrouver leurs déchets. Ci-dessous, vous pouvez trouver un diagramme simplifié du processus de recyclage, des collections en passant par les déchets à la production de nouveaux produits.

Le recyclage représente le retour d'une substance en substance et constante :

Atomes. Cependant, le recyclage peut également être reconnu comme réutilisation d'un produit ou d'un matériau dans d'autres applications, ou comme une conversion d'un matériau en énergie. Cela signifie définir le concept de recyclage en arc ouvert et recyclage en boucle fermée :

- Le recyclage en boucle ouverte est la forme la plus courante de recyclage des matériaux. Les matériaux des produits combinaient parfois avec des ingrédients de la même nature pour contribuer à la création de différents produits. Dans le cas de l'acier, le peut être converti en acier pour les automobiles et vice versa.
- Recyclage dans une boucle fermée

Ce cas est moins courant et plutôt théorique, mais soutenu par des puristes de recyclage.

Les boucles fermées sont conceptuellement attrayantes, mais votent souvent contre les réalités économiques du marché des produits. Ceci est appelé matériau secondaire contrairement aux matières premières pour le reste de cet article. Dans le cas de l'acier, cette source de proximité d'une usine d'acier avec une source de ferraille qui bat le type de produit qui crée cette source. [56].

I.9.2 Impacts du recyclage sur l'environnement

Les avantages économiques et environnementaux du recyclage sont significatifs : il contribue à la protection des ressources, à la réduction des déchets, à la création d'emplois, à la préservation de la nature et à l'économie des matières premières (protection des richesses naturelles) [57] .

Le recyclage permet de diminuer l'extraction de matières premières :

- L'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer.
- Chaque tonne de plastique recyclé** permet d'économiser 700 kg de pétrole brut.

- Le recyclage de 1 kg d'aluminium** peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité.
- L'aluminium est recyclable à 100 % ; 1 kg d'aluminium donne 1 kg d'aluminium après fusion.
- Chaque tonne de carton recyclé permet d'économiser 2,5 tonnes de bois.
- Chaque feuille de papier recyclée permet d'économiser 1 litre d'eau et 2,5 W d'électricité [58].

I.9.3 importance du recyclage dans l'industrie

L'environnement est l'un des principaux problèmes de la société d'aujourd'hui, et l'optimisation de l'utilisation des ressources est l'un des principaux problèmes de ce siècle. Par conséquent, il est important de restaurer les matériaux recyclables, de les organiser, de les gérer correctement, de leur donner une nouvelle vie et de les réintroduire sur le marché. Pour l'industrie

Il est encore plus important de traiter correctement les déchets en raison du large éventail des avantages fournis par la production de déchets et la nouvelle utilisation. Le secteur industriel est l'un des secteurs qui produisent les déchets les plus importants dans les pays développés et produisent de grandes quantités de déchets toxiques et dangereux. Par conséquent, nous parlerons de l'importance du recyclage dans le secteur industriel.

- **L'importance du recyclage dans le secteur industriel :**

Signifie non seulement une contribution à la protection de notre environnement, mais elle va au-delà d'offrir une gamme d'avantages.

- **Économie préservation de matériaux frs d'émiasses naturelles signifie :**

La consommation d'énergie énorme car le matériau doit être extrait puis affiné. Cela signifie le transport et le traitement.

- **Conservation des ressources naturelles :**

Dans certains cas, l'approvisionnement en matières premières peut entraîner une surexposition des sources et la consommation de ces ressources plus rapidement que la régénération naturelle. Cette superposition peut avoir de graves effets environnementaux, économiques et sanitaires.

- **Pollution causée :**

Les processus de fabrication et les économies d'énergie peuvent réduire considérablement les émissions de CO₂ en particulier. Selon le Bureau international du recyclage (BIR), le recyclage économise aujourd'hui 100 kg d'émissions de CO₂ par personne.

- **Avec la diminution des émissions de déchets :**

La saturation des décharges est déjà une réalité. En tri et recyclage correctement les déchets, nous fournissons un environnement adapté aux générations futures.

- **Avantages économiques :**

La réutilisation matérielle réalisée dans les processus industriels peut être une source économique plus importante que prévu. Par conséquent, une bonne élimination des déchets peut réaliser un profit pour les entreprises.

- **Gestion des déchets dans l'industrie**

Les dépenses environnementales de l'industrie ont atteint 2,626 milliards d'euros, selon les dernières données de l'INE. Cela correspond à une augmentation de ,2% par rapport à l'année précédente. Sur le coût total, 38,6% de la gestion des déchets était dédiée.

L'investissement accru dans la gestion des déchets industriels montre à quel point il est important d'utiliser des puits et de convertir le coût d'une entreprise en avantages supplémentaires grâce à une classification et une réutilisation correcte des matériaux recyclables. Un recyclage approprié et une bonne élimination des déchets et de l'environnement dans l'industrie.

Ne poseront pas seulement des dangers potentiels pour la quantité de déchets générés.

Les jours de recyclage mondial aident également à se souvenir de ces valeurs chaque année pour finalement sensibiliser les entreprises et les citoyens.

La transition d'une économie linéaire dans laquelle les ressources sont extraites, utilisées et transformées, une économie circulaire dans laquelle ces ressources se rétablissent, et la nouvelle vie des grandes sociétés et gouvernements circulent en raison des multiples avantages économiques et sociaux qui impliquent cela. [59, 60].

I.9.4 Quelques statistiques de déchets en Algérie

a. Déchets valorisés en Algérie en 2019

Le tableau ci-dessous présente la quantité de déchets récupérés en Algérie :

Tableau I. 5 : Quantité de déchets valorisés en Algérie en 2019 [56].

Type de déchet	Quantité du remboursement/année
Métaux	628 915 tonnes
Plastique	304 321 tonnes
Carton et papier	100 000 tonnes
Métaux non ferreux	66 392 tonnes
Bois	58 895 tonnes
Verre	41 724 tonnes

Le tableau ci-dessus montre que le fer représente la plus grande part du processus de valorisation par rapport aux autres déchets. Il provient souvent de déchets de plusieurs secteurs, comme la construction, suivi du plastique et du papier. Les métaux non ferreux et le bois représentent la plus faible part, suivis du verre Parce qu'il est réutilisé et recyclé.

b. Quantité de déchets recyclables en Algérie

Le président de la Société nationale pour l'environnement et le contrôle de la pollution a présenté les chiffres concernant les déchets recyclables comme suit :

Tableau I. 6 : Quantité de déchets recyclables en Algérie par année [57].

Type de déchet	Quantité annuelle
Métaux	100 000 tonnes
Papier	385 000 tonnes
Verre	50 000 tonnes
Plastique	130 000 tonnes

Le tableau ci-dessus montre que le papier et le plastique sont les déchets les plus recyclables, comparés au verre et aux métaux. Cela indique que ce type de déchets est facilement recyclable et qu'il est abondant dans les océans, compte tenu de la forte demande.

c. Différente catégorie de déchets

Le graphe ci-dessous présente la distribution des déchets collectés par catégorie. Les polymères artificiels représentent 87% de la totalité des déchets ramassés, les 13% restants se répartissent entre le papier avec 7%, le métal 3%, le verre 2% et le tissu 1%. On constate par ailleurs, l'absence quasi-totale de la matière organique.

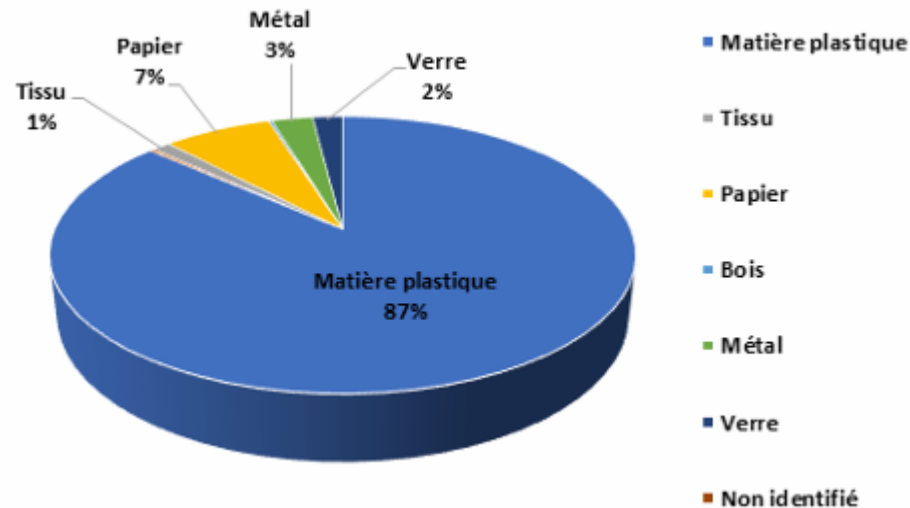


Figure I. 19 : répartition des déchets collectés par catégorie (2019/2020).

I.10 Conclusion

On conclut, les matériaux composites se distinguent par leur capacité à associer les propriétés de plusieurs constituants pour répondre à des exigences techniques spécifiques. Leur conception modulaire permet une grande flexibilité dans le choix des matériaux et des procédés de fabrication, ce qui en fait une solution incontournable dans de nombreux secteurs industriels. Grâce à leur légèreté, leur résistance mécanique élevée et leur durabilité, les composites sont devenus un pilier de l'innovation dans des domaines variés allant de l'aéronautique à la construction. La compréhension approfondie de leurs propriétés fondamentales constitue ainsi une étape essentielle pour leur mise en œuvre optimale dans des applications avancées.

CHAPITRE II :

Partie expérimentale

II.1 Introduction

Dans ce chapitre présente les outils et les produits chimiques utilisé dans l'expérience et divers étapes détaillés qui passe à ce dernier, qui est réalisé au niveau de laboratoire N°4 de génie de procédée (GP4) de la faculté de la science et technologie de l'université Ghardaïa, les tests mécaniques dans laboratoire de ALFAPIPE SPA Ghardaïa.

II.2 Matériaux et méthodes

II.2.1 Procédé de préparation de la matière première :

A- Plastique :

Notre procédure commence la collecte qu'a été fait au début de mois janvier 2025 après

Une semaine l'opération de lavage à commence par immerger la masse plastique dans un bassin de volume pendant 3 jours par un 2 cycle.

Le séchage a été fait à l'aire libre sous l'effet de solaire pendant une durée de 24 heures.

La masse du plastique sec est collecter pour être découpe par ciseaux à main pendante 50g /h, pour avoir un taille **d** moyen maximum de 1 cm.

La préparation des matériaux sent fait suivant la figure ci- dessous :



Figure II. 1 : les étapes de préparation de LDPE.

B- Verre :

- Récupérez une quantité de 1kg de verre et lavez pour éliminer la poussière et les impuretés.
- Broyer le verre en fines particules ou en poudre.
- Nous tamisons le verre en utilisant granulométrie de (1mm).



Figure II. 2 : les étapes de préparation de verre.

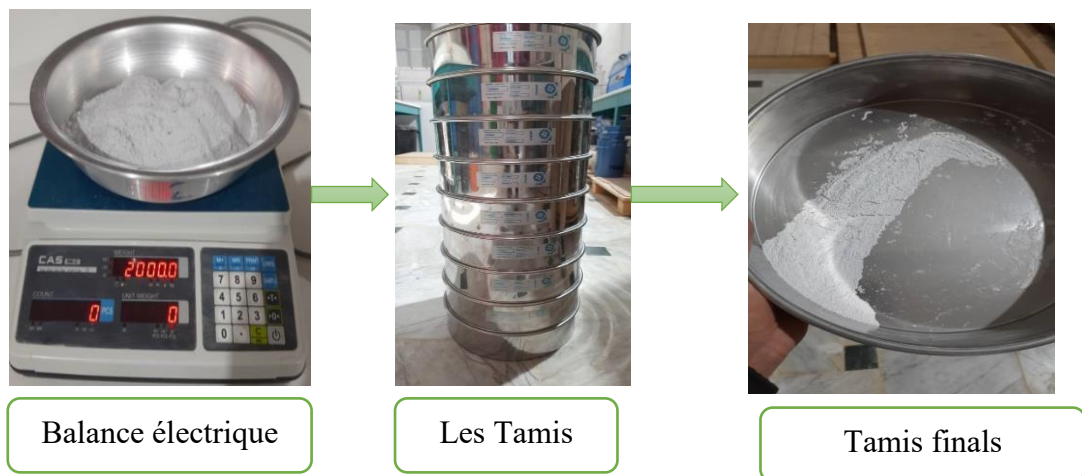


Figure II. 3 : tamisage de poudre de verre t=90min.

II.2.2 procédés de Caractéristique

Les échantillons préparés sont testés afin d'estimer leur performance selon quatre aspects différents :

- Densité par mesure direct.
- Propriété thermique par calorimétrie différentielle à balayage (DSC).
- Propriété mécanique par méthode de traction.
- L'aspect morphologique a été analysé par microscopie.

II.2.2.1 la densité de Plastique :

Ce test a été exécuté dans le laboratoire GP04

Nous avons pris un morceau de plastique carré de 10cm de côté, puis nous avons mesuré son épaisseur à l'aide d'un appareil pied à coulisse et nous trouvons $e=0,128$ mm.

$$e = \frac{1,28}{10} = 0,128 \text{ mm}$$

$$V = a \times b \times c$$

$$V = 100 \times 100 \times 0.128 = 1280 \text{ mm}^3$$

$$m = 1.133 \text{ g}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1.133}{0.00128} = 885.156 \text{ kg/m}^3$$

On a $0.91 < \rho_{LDPE} < 0.94$ donc notre plastique appartient à type LDPE



Figure II. 4 : la masse et l'épaisseur de morceau du plastique.

II.2.2.2 Verre

Une expérience a été réalisée au sein du laboratoire de génie civil, visant à analyse granulométrique de verre par tamisage de 8 tamis afin d'obtenir une poudre contenant des particules d'un diamètre inférieur à $80\ \mu\text{m}$.

II.2.2.3 Solvant

Le tableau suivant montre les propriétés de deux solvants qui sont utilisés dans les expériences :

Tableau II. 1 : les propriétés des produits chimiques.

Propriété	Produit	
Nom	Toluène	Benzène
Formule chimique	C ₇ H ₈	C ₆ H ₆
Masse molaire	92,14 g/M	78,11 g/M
Densité (à 20°C)	0,8669 g/cm ³	0,8765 g/cm ³
Point d'ébullition	110,6 °C	80,1 °C
Point de fusion	-95 °C	5,5 °C
Solubilité dans l'eau	Très faible	Très Faible
Apparence	Liquide incolore	Liquide incolore
L'odeur	Douce, semblable au dissolvant	Douce, aromatique
Utilisation courante	Solvant, carburant, peintures	Solvant, synthèse chimique
Toxicité	Moins toxique que le benzène	Cancérogène ne reconnu (groupe 1CIRC)
Inflammabilité	Haut	Haut

On choisit le toluène parce qu'il a moins de toxicité par rapport au benzène, et sa température d'ébullition est plus élevée.

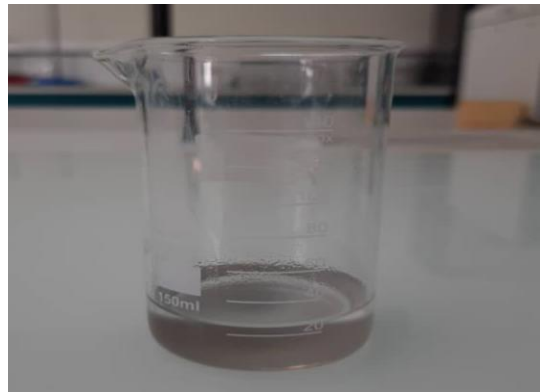
II.2.3 Méthode de préparation de composte (LDPE/ VERRE)

Le matériau composite (LDPE/verre) a été préparé au sein du laboratoire GP04 selon le procédé suivant :

La matière vierge de référence (LDPE) est préparée selon l'expérience n°1, tandis que les matériaux composites (LDPE/verre) sont préparés selon l'expérience n°2.

a. Expérience N°1 :

-On pesé 20g des morceaux de plastique et on mesure un volume de 20 ml de toluène.



Premièrement on garde la température ambiante (25°C), dans un bécher sous hotte,

Figure II. 5 : la masse de plastique et le volume de toluène.

20 g de morceaux de plastique (déchets) ont été dissous dans 20 ml de toluène dans un bécher de 100 ml.

Une agitation magnétique à 250 rpm a été utilisée pour disperser les morceaux de plastique dans le solvant.

Finalement Couvre le bécher d'une papier aluminium et fixe la température à 70° C

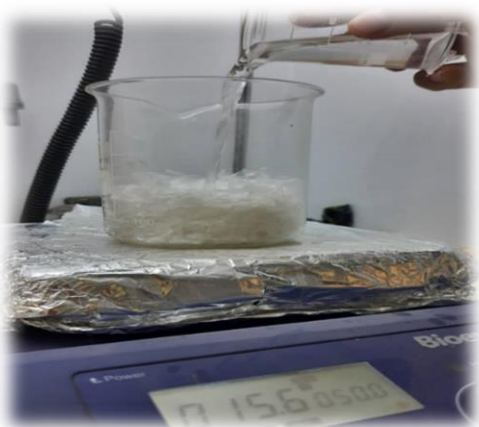


Figure II. 6 : mélanger et agiter les constituants.

Poursuivre l'agitation tout en contrôlant la température, jusqu'à obtention d'une pâte homogène (durée : 30 minutes).



Figure II. 7 : la pâte homogène.

b. Expérience N°2 :

On pèse 1g de poudre de verre et 20 g avec de diamètre $\epsilon > 80\mu m$ des morceaux

De plastique et on mesure un volume de 20 ml de toluène.

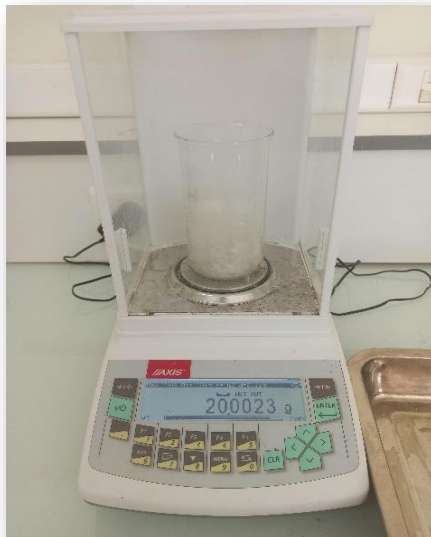


Figure II. 8 : les masses de LDPE et de verre.

En maintenant la température ambiante à 25°C, on verse 20 ml de toluène dans un bécher placé sous une hotte, puis on y ajoute 20 g de morceaux de plastique. Le mélange est agité magnétiquement jusqu'à ce que le plastique soit complètement dissous ou que la dispersion soit homogène.

Ensuite, on introduit lentement la poudre de verre dans ce mélange tout en continuant l'agitation. Le bécher est ensuite couvert à l'aide d'un papier aluminium pour éviter l'évaporation du solvant. La température est ensuite progressivement portée à 70°C. L'agitation est maintenue pendant environ 30 minutes, tout en contrôlant la température, jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène.

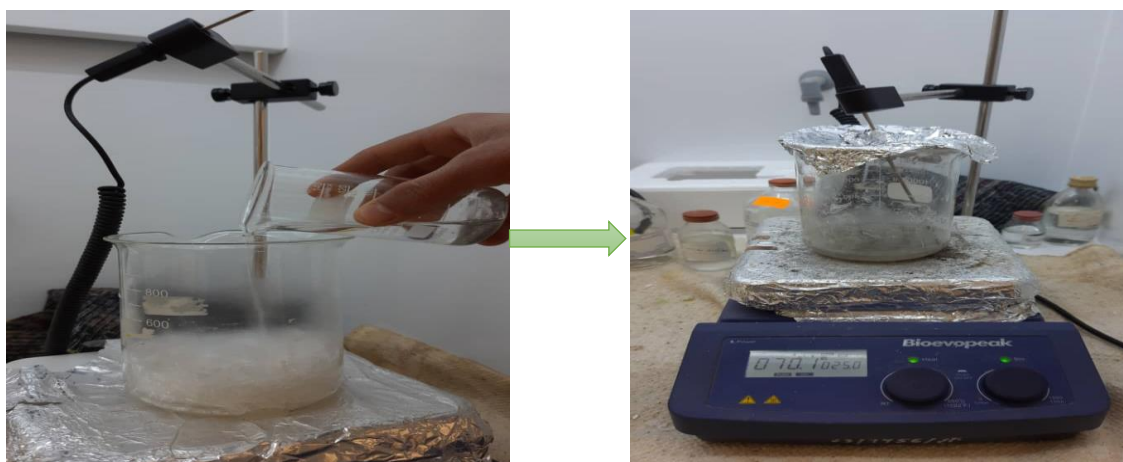


Figure II. 9 : agitation les 3 constituants.



Figure II. 10 : contrôler la collection.

Pour préparer la formulation du composite (LDPE/verre), nous avons suivi le dosage présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau II. 2 : la formulation du composite (LDPE/verre).

Échantillons	Masse de LDPE(g)	Masse de verre (g)	Désignation
LDPE 100 %	20	0	P
LDPE-Verre (5 %)	20	1	P-V5
LDPE-Verre (9 %)	20	2	P-V9
LDPE-Verre (13 %)	20	3	P-V13

II.2.4 Préparation des échantillons

La préparation des échantillons composites a été effectuée selon les étapes suivantes :

- **Dégazage :**

Après préparation, les quatre échantillons sont placés dans une étuve à 110°C pendant 30 minutes afin de dégazer le solvant (toluène) que pour à être présente dans la matière (évacuer)



Figure II. 11 : dégazage des échantillons.

- **Moulage**

Les échantillons dégazés sont ensuite placés dans un moule en silicone.

Le moule est mis dans l'étuve, à une température de 190°C pendant 1 heure, avec un contrôle continu de la température.



Figure II. 12 : Moulage des échantillons.



Figure II. 13 : Les échantillons finals.

II-3 Procédé de caractérisation pour essai de traction (ISO 527-4)

➤ Définition ISO (527-4)

(ISO 527-4 : Plastiques — Détermination des propriétés en traction — Partie 4 : Conditions d'essai pour les matériaux composites renforcés de fibres (essais uni axiaux))

Elle définit les méthodes d'essai en traction uni axiale pour les matériaux composites renforcés de fibres, notamment :

Composites à matrice polymère renforcés de fibres longues ou continues (comme la fibre de verre, de carbone, etc.).

➤ Méthode :

- Allumer la plaque chauffante et régler la température à 200°C et placer l'échantillon solide au centre de la plaque chauffante.
- Une fois la fusion complète, lisser la surface fondue à l'aide du cylindre métallique afin d'obtenir une épaisseur uniforme.



Figure II. 14 : adapter l'échantillon sur la plaque chauffante.

- Laisser refroidir légèrement jusqu'à solidification partielle après retirer l'échantillon solidifié de la plaque.

- Utiliser la machine de découpe pour tailler l'échantillon selon les dimensions spécifiques requises. (Type 1B).

Tableau II. 3 : Type 1B Specimen.

Symbol	Name	Dimensions in millimetres
l_3	Overall length ^a	≥ 150
l_1	Length of narrow parallel-sided portion	$60,0 \pm 0,5$
r	Radius ^b	≥ 60
b_2	Width at ends	$20,0 \pm 0,2$
b_1	Width of narrow portion	$10,0 \pm 0,2$
h	Thickness	2 to 10
L_0	Gauge length (recommended for extensometers)	$50,0 \pm 0,5$
L	Initial distance between grips	115 ± 1

^a For some materials, the length of the tabs can be extended (e.g. so that $l_3 = 200$ mm) to prevent breakage or slippage of the specimen in the jaws.

^b It should be noted that a thickness of 4 mm gives a specimen which is identical to the type 1B specimen specified in ISO 527-2.

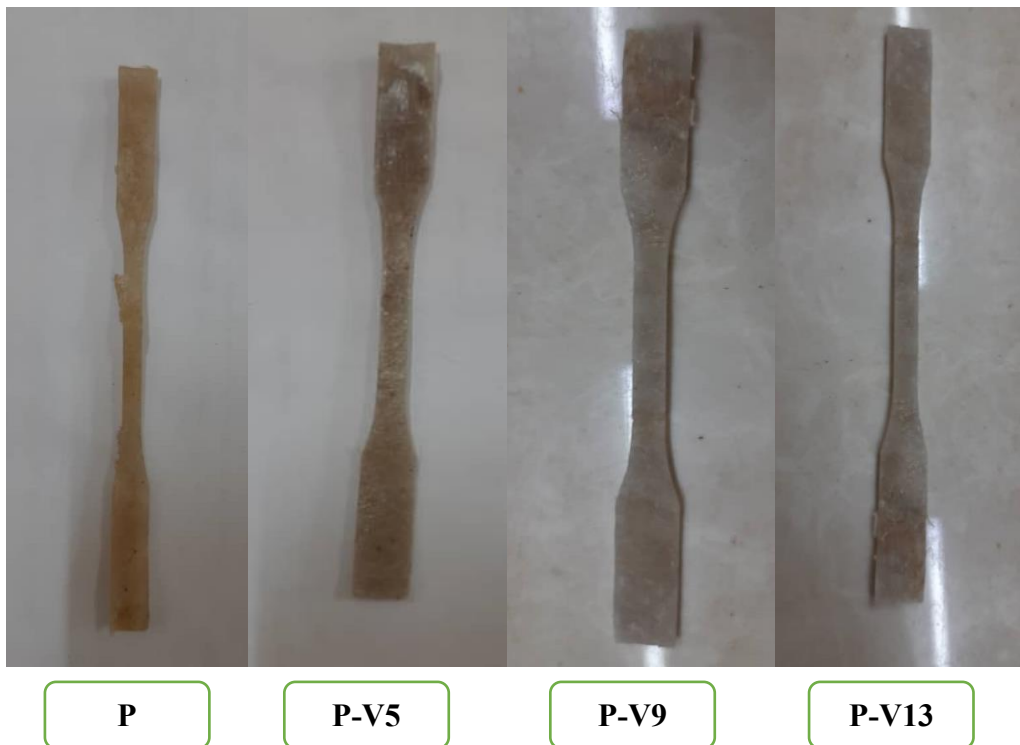


Figure II. 15 : les trois spécimens.

Ces éprouvettes ont été placées dans la machine de traction de type Zwick/ Roell 2,5KW

Avec une vitesse de traction de 100mm/min et pré charge de 0,1 MPa.

CHAPITRE III :

Résultats et Discussion

III. 1 Introduction

La présentation des résultats sera faite selon l'ordre mentionné dans la section précédente. Les caractéristiques du matériau collecté seront présentées en premier, suivies des résultats des évaluations mécaniques, thermiques ainsi que microscopiques.

III. 2 Caractéristiques du granulométrique de verre par tamisage

Le procédé de préparation du verre a duré 2 heures et a donné la granulométrie présentée dans le tableau suivant.

$$R(\%) = w_i(\%) = \frac{m_i}{m_T} * 100$$

$$R_{cum} = R_{cum-1} + R(\%)$$

$$P(\%) = 100 - R(\%)$$

Tableau III. 1 : les différentes masses de passé et de refus selon les diamètres des tamis.

N°	$m_i(g)$			d_i (mm)	Refus (%)	Refus cum	Passé (%)
1	315	340	239,5	0,630	30,07	30,07	69,93
2	177	157	196	0,400	17,82	47,89	82,18
3	97,5	89,5	97,5	0,315	9,56	57,45	90,44
4	145	161	148,5	0,200	15,28	72,73	84,72
5	58	68	73,5	0,160	6,7	79,43	93,3
6	88,5	70	78	0,125	7,95	87,38	92,05
7	45,5	48	30,5	0,100	4,16	91,54	95,84
8	30	33	46,5	0,080	3,68	99,22	96,32
9	141			0	4,74	99,96	95,26
	$\Sigma m_i = 2974$						

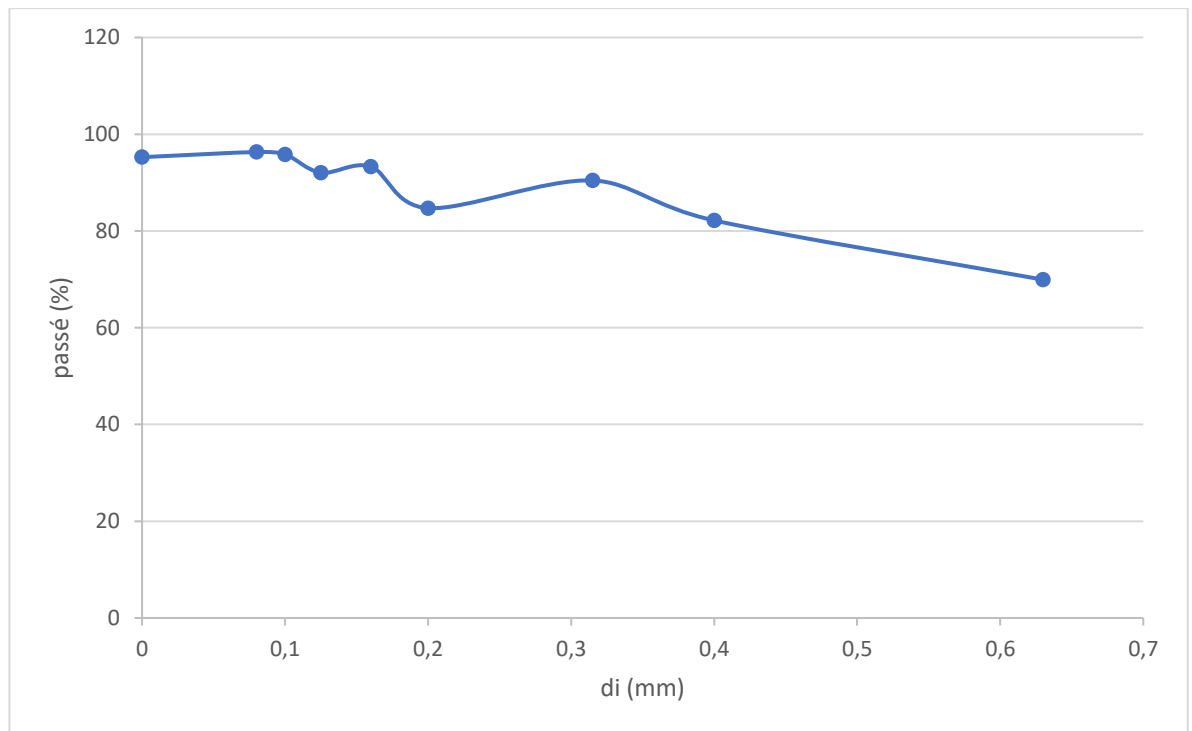


Figure III.1 : Courbe de granulométrie.

III.3 Teste mécanique (résistance à la traction)

Une expérience de traction a été réalisée au sein de SPA ALFAPIPE à Ghardaïa, Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus pour quatre échantillons.

Les propriétés de l'expérience :

Matériau : LDPE+ le verre

Type d'éprouvette : ISO 527-4

Température d'essai : 23

Données machine : Zwick/Roell 2.5 KN

Précharge : 0,1 MPa

Vitesse d'essai : 100 mm/min

Ecartement entre outillage pour position initiale : 64,00 mm

L0-course standard : 25 mm

Allongement nominale : méthode B

III.3.1 Les résultats de traction :

Tableau III. 2 : Résumer des résultats de l'essai de traction.

	σ_e (MPa)	ε_e (%)	E (Mpa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\varepsilon_{\max}$ (%)
LDPE	4.8	2	240	8.3	23.5
LDPE + 1g	2	1.5	133	8.5	29.5
LDPE +2g	2	0.66	303	8	13.5
LDPE +3g	3.1	1	310	5.5	2

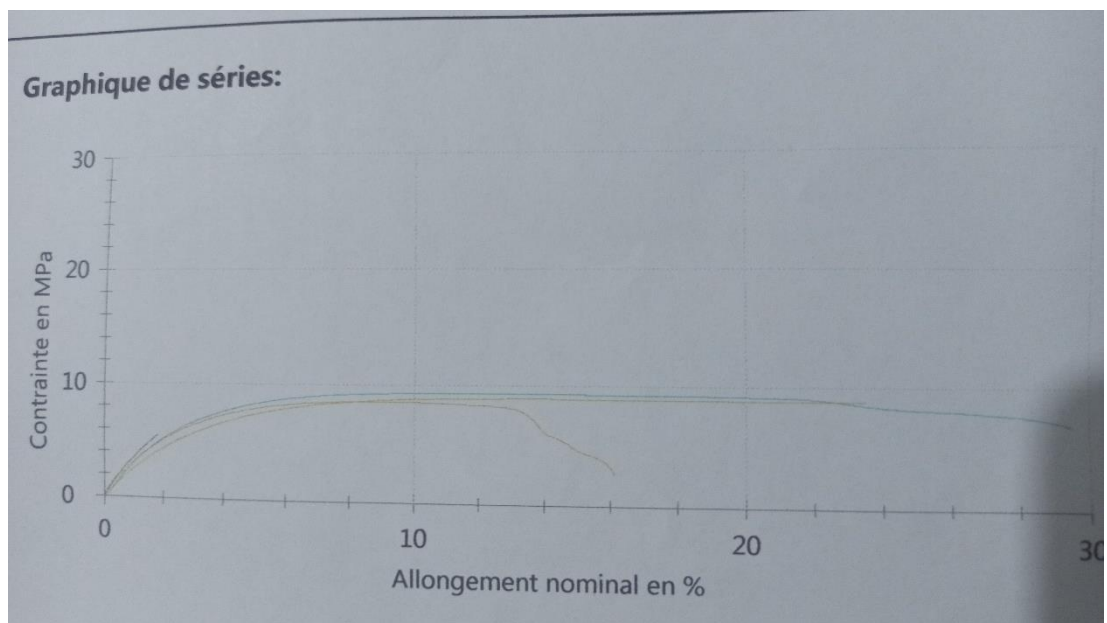


Figure III. 2 : la courbe d'allongement nominale.

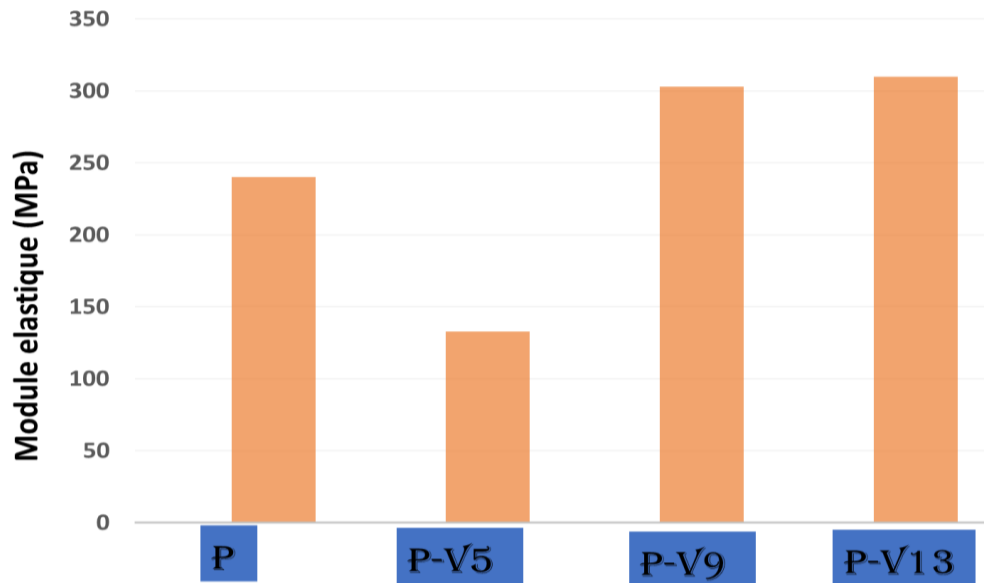


Figure III. 3 : Les résultats du module d'élasticité des différents composites et LDPE pur.

Les résultats du module d'élasticité montrent comme attendu une augmentation dans l'élasticité des composites, car le matériau profite de l'existence de la particule de verre pour se durcir et cela est bien clair dans les matériaux P-V9 et P-V13.

On peut estimer l'augmentation minimale de ces particules de verre en utilisant la loi distributive du composite présentée dans l'équation (6) pour le module d'élasticité on peut écrire :

$$E_c = X_r E_r + X_m E_m \quad (6)$$

Le X_r et X_m sont les fractions du renforcement (verre) et matrice (LDPE), ainsi que E_m et E_r expriment les modules d'élasticité de la matrice et l'agent renfort (verre).

Le tableau (3) ci-dessous présente les résultats pour les composites fabriqués

Tableau III. 3 : les résultats pour les composites fabriqués.

Matériaux	Fraction x_r	Module élasticité E (MPa)	Equation 6	Estimation différence
LDPE	-	240	-	-
Verre	-	70000	-	-
P-v5	0.05	133	3728	X28 fois
P-v9	0.09	303	6518	X 21 fois
P-v13	0.13	310	9308	X 30 fois

Commentaire :

Le résultat a montré que les composites possédant une caractéristique mécanique plus faible que les matériaux vierges ce qu'est logique parce-que le polymère et le verre sont fatigués par les cycles thermiques qu'ils ont subi pendant leur transformation et leur mise au rebut.

On compare notre matériau avec d'autres matériaux composites :

Tableau III.4 : comparaison entre module d'élasticité d'autres matériaux composites

Type de renfort	Module d'élasticité (MPa)
LDPE sans renforts	180- 300
LDPE +verre	900-2500
LDPE + Fibres naturelles (jute, chanvre, paille, etc.)	600-1500
LDPE + Fibres de carbone	4000-8000
LDPE + Kevlar (fibres aramides)	2500-4000

Le tableau met clairement en évidence l'impact du type de renfort sur le module d'élasticité du LDPE.

Le LDPE vierge, avec un module compris entre 180 et 300 MPa, reste très flexible mais mécaniquement peu performant.

L'ajout de fibres de verre améliore considérablement la rigidité du matériau, avec un module pouvant atteindre 2500 MPa, ce qui représente une augmentation de près de 8 à 10 fois selon la teneur en verre.

Les fibres naturelles apportent une amélioration intermédiaire, combinant une certaine rigidité avec un avantage écologique, bien que leur comportement soit plus sensible à l'humidité.

En revanche, les fibres de carbone et les aramides offrent des performances mécaniques exceptionnelles, avec des modules pouvant dépasser 4000 MPa, mais au détriment du coût et de la complexité de mise en œuvre.

En conclusion, le renfort par fibres de verre représente un bon compromis entre performance, coût et faisabilité industrielle pour des applications structurales ou semi-structurales.[61]

Il n'a pas été possible d'obtenir une imagerie SEM pour les surfaces fracturées afin d'étudier le mécanisme de rupture, mais le niveau d'allongement à la rupture peut nous dire que le verre dans le p-v5 a formé une phase séparée au sein du matériau car son allongement (29.5%) était suffisamment élevé pour imiter celui du LDPE pur (23.5%).

III.4 La calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

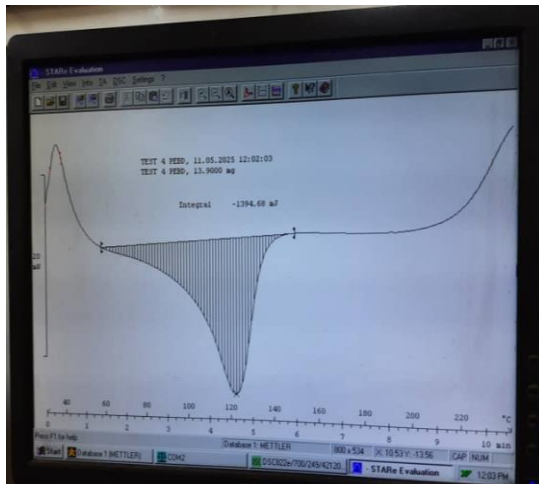
Les échantillons sont testés avec les conditions suivantes

- **Plage de température :** 40 ° C - 220 ° C
- **Taux de chauffage contrôlés :** 20 ° C / minute
- **Température précision :** +/- 0.01 ° C

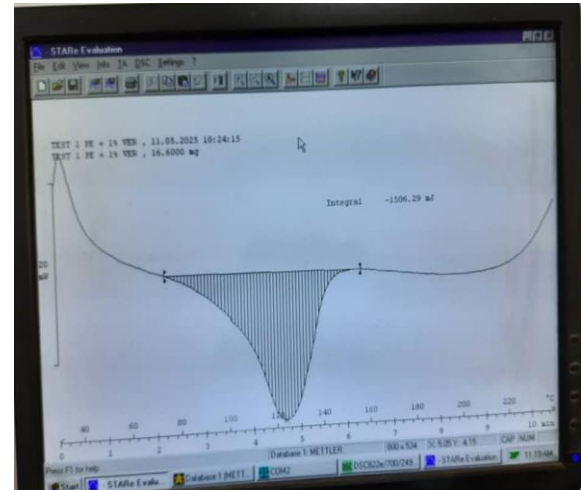


Figure III. 4 : la machine de DSC.

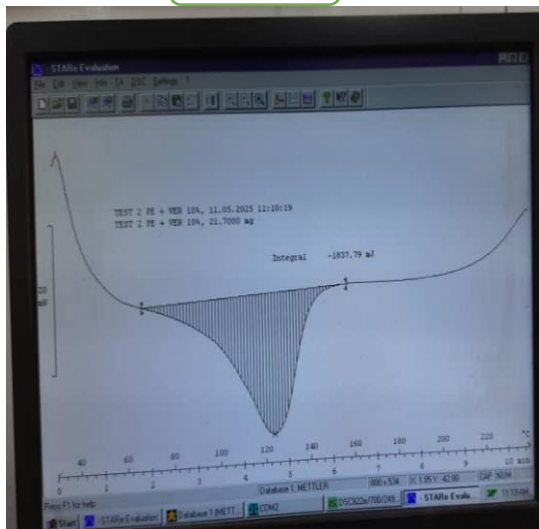
III.4.1 Les résultats de DSC :



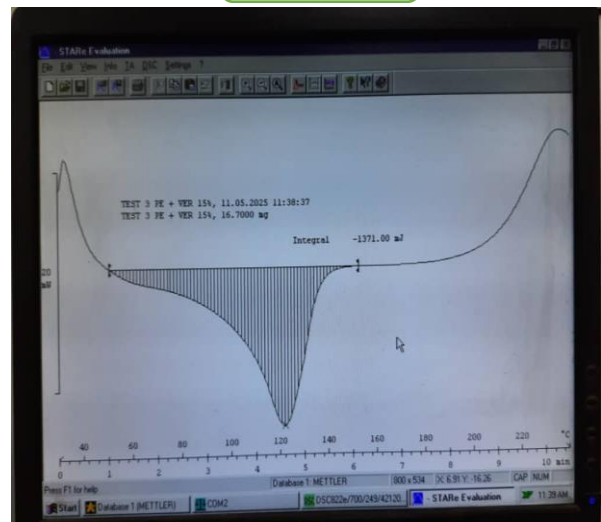
LDPE



P-V5



P-V9



P-V13

Figure III. 5 : Les graphes de DSC.

Commentaire :

Les graphes de DSC ont montré que les matériaux montrent un pic de transition vitreuse ou ramollissement au maximum de 120°C et que la transition absorbe de l'énergie ($\Delta H < 0$) ce qu'est logique car les molécules ont besoin de l'énergie pour commencer un mouvement à longue portée.

Les résultats obtenus des graphes présenter dans les Figures (5,6,7,8) sont résumer dans le Tableau (4).

Tableau III. 5 : le résultat de DSC.

Matériaux	Mass (mg)	Enthalpie (mJ)	Energie J/g
LDPE	13.9	-1394.68	100.35
P-V5	16.6	-1506.29	90.7
P-V9	21.7	-1837.79	84.7
P-V13	16.7	-1371	82

L'effet de renforcement de verre sur le comportement thermique des composites est présenté dans le graph présenter dans la figure (8).

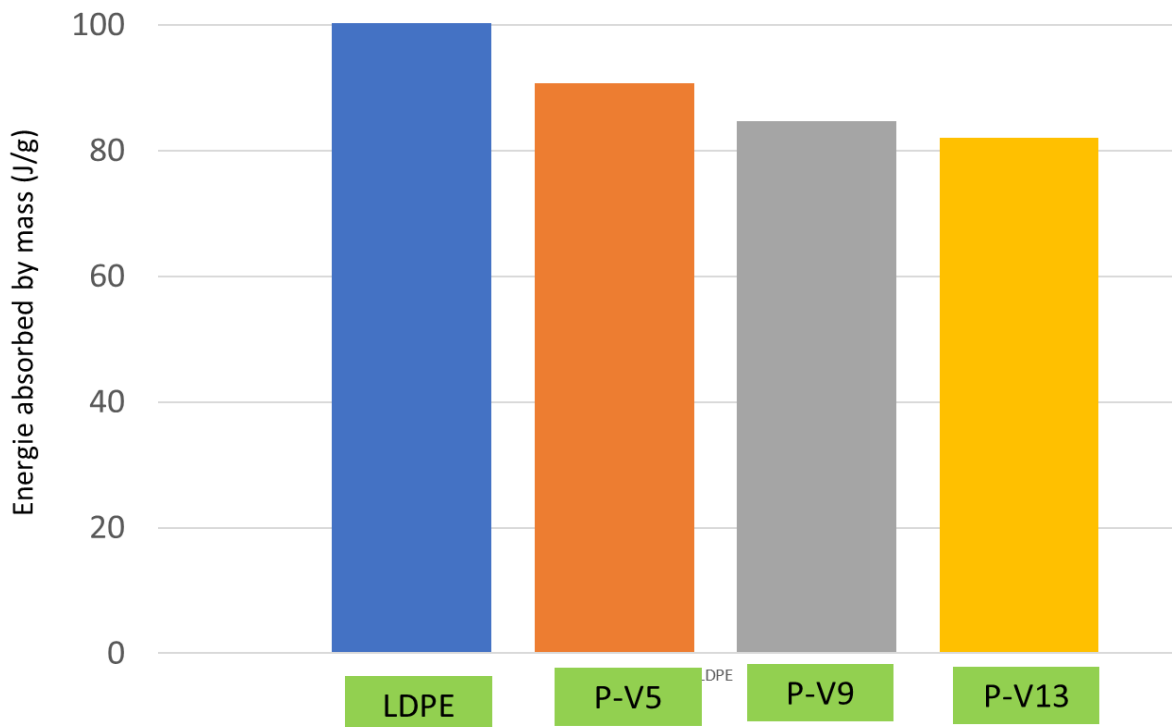


Figure III. 6 : énergie absorbée par masse(j/g).

Commentaire :

L'énergie absorber par unité de masse diminue avec argumentation de la concentration du verre ce que signifier que le verre n'a aucun effet dans la résistance de mobilité moléculaire alors on a une absence totale d'interaction d'adhésion entre le verre et le polymère et le mécanisme de renforcement est purement physique (le polymère a piégé les particules de verre dans un réseau moléculaire).

III.5 Microscope optique :

Nous avons analysé la surface du matériau à l'aide d'un microscope optique au niveau de Plateforme technique d'analyses physiques et chimiques (CRAPC) Ouargla et nous avons obtenu les images à un agrandissement de 10 fois et échelle de (200 μm) qui présenté dans figure (6)

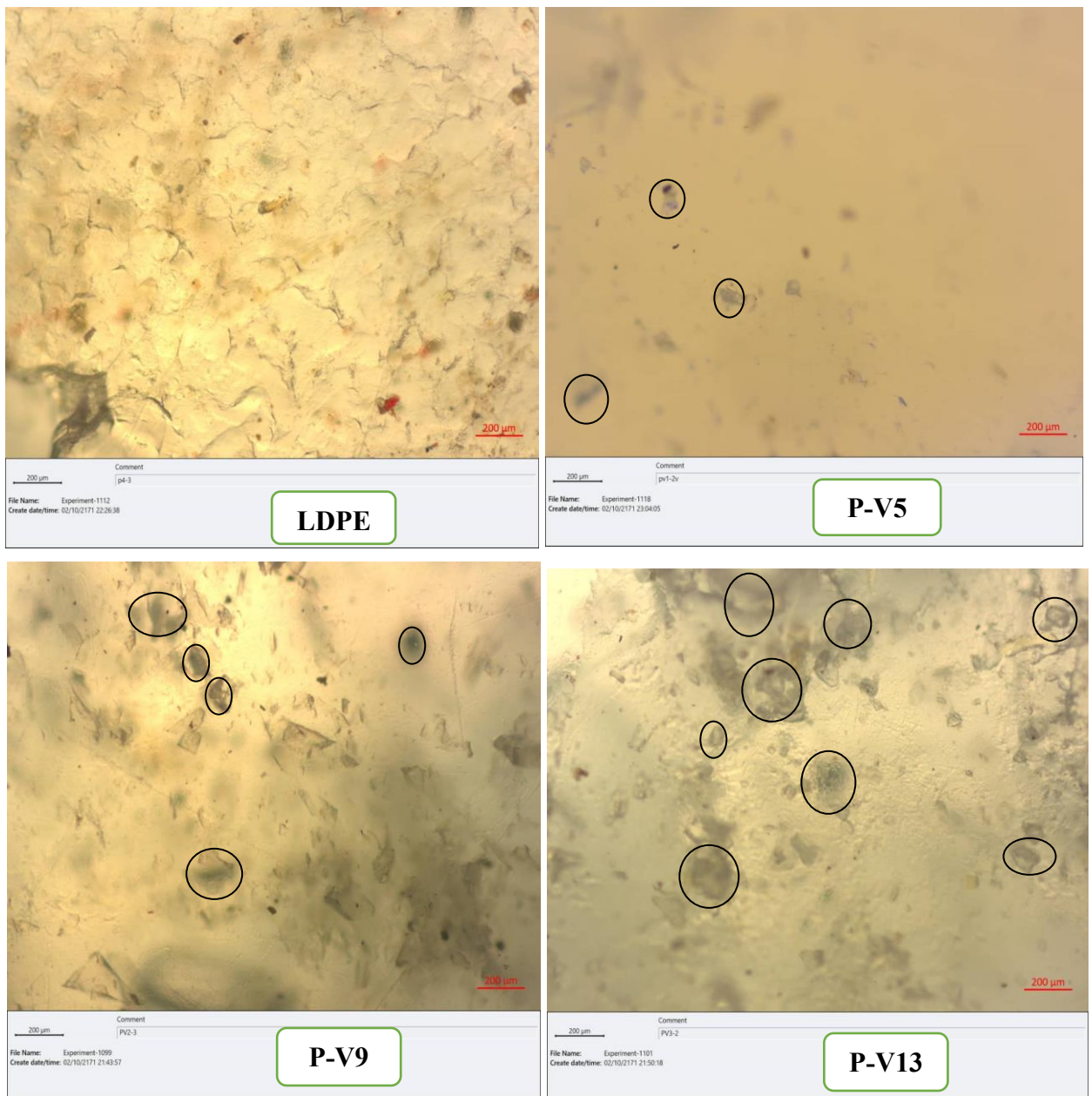


Figure III.7 : la morphologie de composite

Nous observons la distribution des particules de verre au niveau de la surface de la structure matricielle, ce qui indique que le matériau en verre peut être confondu comme renfort avec le matériau plastique à base densité comme matrice.

III.5 Conclusion

L'étude a montré que la combinaison de LDPE recyclé et de verre peut être utilisée pour créer des composites polymères, mais la fabrication d'objets utiles à partir de ces composites reste un défi.

Les principaux résultats de l'étude sont

- Le verre à apporter l'effet de renforcement à la matrice de LDPE mais a un effet faible.
- Le mécanisme de renforcement est purement physique.

Il est nécessaire donc de passer à travailler sur l'amélioration de compatibilité chimique entre le verre et le polymère en utilisant soit méthode chimique (agent de couplage) ou voit physique (plasma ...).

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude démontre que le composite LDPE/verre présente un bon équilibre entre rigidité, flexibilité et stabilité thermique, avec un taux optimal de renfort de 5 %. Toutefois, des efforts sont à poursuivre pour améliorer l'adhésion interfaciale via des agents de couplage.

Les étapes de l'expérience ont débuté par la collecte, le tri et la préparation des matières premières : broyage du verre, nettoyage et découpage du plastique LDPE. Ensuite, ces composants ont été mélangés selon différentes proportions, puis soumis à un procédé de mise en forme thermique (pressage à chaud) afin d'obtenir les échantillons de matériaux composites. Ces derniers ont été analysés à l'aide de tests mécaniques (résistance à la traction) et thermiques (DSC).

Les résultats obtenus montrent que l'ajout de verre améliore globalement la rigidité, la résistance à la traction et la stabilité thermique du composite. Cependant, un excès de verre peut rendre le matériau plus fragile et moins homogène. Le meilleur compromis a été observé pour un taux modéré de verre (environ 5 % en masse), qui permet d'obtenir un bon équilibre entre performance mécanique et flexibilité.

Pour améliorer davantage les résultats à l'avenir, plusieurs recommandations peuvent être proposées :

Il est nécessaire donc de passer à travailler sur l'amélioration de compatibilité chimique entre le verre et le polymère en utilisant soit méthode chimique (agent de couplage) ou voie physique (plasma ...).

Tester d'autres types de plastiques recyclés (HDPE, PP) pour comparer la compatibilité avec le verre.

Expérimenter avec des agents de couplage ou additifs pour améliorer l'adhérence entre les deux phases.

Optimiser les paramètres de mise en forme (température, pression, durée).

Proposer des analyses SEM ou DMA

Utiliser des machines plus avancées pour améliorer le produit final

Conclusion générale

En conclusion, cette étude démontre le potentiel technique et environnemental de la valorisation conjointe des déchets plastiques et verriers. Le matériau obtenu pourrait constituer une solution innovante et écologique pour différents secteurs, tout en s'inscrivant dans les objectifs du développement durable et de l'économie circulaire.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A. N. d. Déchets, "Rapport annuel sur la gestion des déchets en Algérie (2019–2022)," Agence Nationale des Déchets, Alger, Algérie 2022.
- [2] A. L. Andrady and M. A. Neal, "Applications and societal benefits of plastics," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, pp. 1977-1984, 2009.
- [3] J. Lin, J. Hong, and Y. Xiao, "Dynamic characteristics of 100% cold recycled asphalt mixture using asphalt emulsion and cement," *Journal of Cleaner Production*, vol. 156, pp. 337-344, 2017.
- [4] G. Chrétien, *Matériaux composites à matrice organique: polymères et renforts type: caractéristiques, technologies de mise en forme: applications*: Technique et documentation, 1986.
- [5] B. MEDJDOUBI, "Estimation des propriétés effectives des structures en matériaux composites avancés," 2024.
- [6] J.-L. Billoët, *Introduction aux matériaux composites à hautes performances*: Teknea, 1993.
- [7] S. S. BERKOUS Radja, "Elaboration et Caractérisation d'un Bio-composite à Base de PEHD Recyclé et de la Fibre de Lin," 2019.
- [8] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*: CRC press, 2007.
- [9] K. Friedrich and U. Breuer, *Multifunctionality of polymer composites: challenges and new solutions*: William Andrew, 2015.
- [10] Y. Hirose, H. Matsuda, G. Matsubara, M. Hojo, and F. Inamura, "Proposal of the concept of splice-type arrester for foam core sandwich panels," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, pp. 1318-1325, 2012.
- [11] M. Balasubramanian, *Composite materials and processing* vol. 711: CRC press Boca Raton, 2014.
- [12] FILAB. (2025, 4 JUNE 2025). *Matériaux composites : applications et caractérisation*. Available: <https://filab.fr/nos-prestations/analyse/laboratoire-caracterisation-des-materiaux/materiaux-composites-applications/>
- [13] P. S. Chum and K. W. Swogger, "Olefin polymer technologies—History and recent progress at The Dow Chemical Company," *Progress in Polymer Science*, vol. 33, pp. 797-819, 2008.
- [14] L. Andersson and T. Hjertberg, "The effect of different structure parameters on the crosslinking behaviour and network performance of LDPE," *Polymer*, vol. 47, pp. 200-210, 2006.
- [15] L. Piché, "Synthèse et caractérisation de nouveaux catalyseurs à base de palladium et de ruthénium pour la polymérisation de l'éthylène et sa copolymérisation avec des monomères polaires," 2011.
- [16] C. Dubrocq-Baritaud, "Mécanismes d'action de" Polymer Processing Aids" fluorés durant l'extrusion d'un polyéthylène basse densité linéaire: études expérimentales et interprétations," École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008.
- [17] F. Addiego, "Caractérisation de la variation volumique du polyéthylène au cours de la déformation plastique en traction et en fluage," Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.
- [18] L. Douminge, "Etude du comportement du polyéthylène haute densité sous irradiation ultraviolette ou sollicitation mécanique par spectroscopie de fluorescence," Université de La Rochelle, 2010.
- [19] M. Taleb, "Phénomènes aux interfaces des isolants: mesure et simulation," Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2011.
- [20] ELF ATCHEM, "Connaissance de polyéthylène," ELF ATCHEM octobre 1995.

Références bibliographiques

- [21] C. V. Chira, A. I. Obi, D. S. Yawas, D. O. Obada, I. A. Samotu, and A. Adesanmi, "Studies on Morphological and Thermal Properties of Low Density Polyethylene/Maize Cob Ash Particulate Composite," *IOSR Journal of Engineering*, vol. 4, pp. 42-47, 2014.
- [22] C. Cerclé, "Optimisation du phénomène d'émulsion dans les mélanges amidon thermoplastique/polyéthylène," École Polytechnique de Montréal, 2009.
- [23] M. M., "Modélisation et simulation d'un réacteur chimique tubulaire 'Application à la polymérisation des oléfines," Doctorat, Génie des Polymères, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2013.
- [24] A. H. Maryudi, R. M. Yunus, and M. D. H. Bag, "Thermo-oxidative degradation of high density polyethylene containing manganese laurate," *Int J Eng Res Appl*, vol. 3, pp. 1156-1165, 2013.
- [25] (2023, JUNE 4). *LDPE plastic image* Available: <https://www.businesswaste.co.uk/wp-content/uploads/2023/07/Ldpe.png>
- [26] N. Lahoud, "Modélisation du vieillissement des isolants organiques sous contrainte électrique: Application à la fiabilité des matériaux," Toulouse 3, 2009.
- [27] S. Khellaf, "Réticulation mécanisme réactionnel du polypropylène isotactique et du polypropylène isotactique reticule," 2018.
- [28] W. Eitel, "Der Glaszustand. Von G. Tammann. 123 Seiten mit 86 Abbildungen im Text. Verlag Leop. Voß, Leipzig 1933. Preis RM. 8, 70," ed: Wiley Online Library, 1933.
- [29] D. D. I. f. Normung, "Glas: Begriffe für Glasarten und Glasgruppen," Berlin, Germany DIN 1259-1:1986-09, 1986.
- [30] F. Simon, "Fünfundzwanzig Jahre Nernst scher Wärmesatz," *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften*, pp. 222-274, 1930.
- [31] D. R. K. Uhlmann, N.J., Ed., *Glass: Science and Technology*. New York, London: Academic Press, 1980–1986, p. ^pp. Pages.
- [32] H. Scholze, *Glass: nature, structure, and properties*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [33] W. Muschick, "Density titration-A simple method for the determination of density variations in glasses," 1987.
- [34] I. Fanderlik, "Optical properties of glass," *Optics Laser Technology*, vol. 17, pp. 50-50, 1985.
- [35] Anon, *Bibliography of physical properties of glass: strength-hardness-elasticity*. Charleroi: International Commission on Glass, 1967.
- [36] G. M. Bartenev, "The structure and mechanical properties of inorganic glasses," (*No Title*), 1970.
- [37] J. Stevels, "The electrical properties of glass," *Handbuch der Physik/Encyclopedia of Physics*, pp. 350-391, 1957.
- [38] L. Hench and H. Schaake, "Electrical properties of glass," in *Introduction to Glass Science: Proceedings of a Tutorial Symposium held at the State University of New York, College of Ceramics at Alfred University, Alfred, New York, June 8–19, 1970*, 1972, pp. 583-659.
- [39] A. Owen, "The electrical properties of glasses," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 25, pp. 370-423, 1977.
- [40] Anon, *Electrical properties of glasses, glass-ceramics and amorphous solids. A bibliography covering the period 1967-1976* vol. 2-1. Charleroi: international commission on Glass, 1977.
- [41] P. Hrma, "Effects of surface forces in glass technology (a review)," 1982.
- [42] J. Suire, "Réactions entre le verre et l'acide fluorhydrique," *Silicates Industriels*, vol. 36, pp. 73-79, 1971.
- [43] D. T. LIANG and D. W. Readey, "Dissolution kinetics of crystalline and amorphous silica in hydrofluoric-hydrochloric acid mixtures," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 70, pp. 570-577, 1987.
- [44] J. W. Mellor, "Die Beständigkeit von keramischen Fritten, Glasuren, Gläsern und Emails bei der Verwendung," *Sprechsaal*, vol. 69, pp. 613–616, 629–633, 641–643, 658–661, 673–676, 687–690, 703–705, 719–722, 1936.

Références bibliographiques

- [45] R. G. Newton "The durability of glass - a review," *Glass Technol*, vol. 26, pp. 38-21, 1985.
- [46] A. F. White, "Weathering characteristics of natural glass and influences on associated water chemistry," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 67, pp. 225-244, 1984.
- [47] R. C. Ewing and M. J. Jercinovic, "Natural analogues: their application to the prediction of the long-term behavior of nuclear waste forms," *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, vol. 84, p. 67, 1986.
- [48] H. Scholze, "Chemical durability of glasses," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 52, pp. 91-103, 1982.
- [49] L. Holland, "The properties of glass surfaces," (*No Title*), 1964.
- [50] M. A. Besborodov, *Chemische Beständigkeit der Silicatgläser*. Minsk: Verlag Wissenschaft und Technik, 1972.
- [51] L. L. Hench, D. E. Clark, and E. L. Yen-Bower, "Corrosion of glasses and glass-ceramics," *Nuclear and chemical waste management*, vol. 1, pp. 59-75, 1980.
- [52] R. Doremus, "Chemical durability of glass," *Treatise Mater. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 41-69, 1979.
- [53] H. Tiesler, "Zum chemischen Verhalten der Oberfläche glasiger Silicate gegenüber wässrigen Medien," *Glastech. Ber.*, vol. 54, pp. 136–143, 369–381, 1981.
- [54] F. Ernsberger, "Current theories of glass durability," *Collected papers*, 1986.
- [55] Anon, *The chemical durability of glass. A bibliographic review of literature* vol. 1 and 2. Charleroi: The chemical durability of glass. A bibliographic review of literature, 1972 and 1973.
- [56] R. Zapp, R. Decker, M. S. Dyroff, and H. A. Rayner, "Stoichiometry of vulcanization with sulfur," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 24, pp. 878-893, 1951.
- [57] A. Blanc, "Elaboration et Recyclage Des Métaux " in *Techniques de l'Ingénieur*, T. d. l'Ingénieur, Ed., ed: Techniques de l'Ingénieur
- [58] Récupération Fer & Métaux. (June 4). *Impacts du recyclage sur l'environnement*. Available: <https://recuperation-fer-metaux.com/impacts-du-recyclage-sur-lenvironnement/>
- [59] K. CHALA, "Elaboration et caractérisation d'un matériau à base de Polyéthylène basse densité recyclé et chargé par le Talc," 2016.
- [60] ScrapAd. (2021, June 9). *Importance du recyclage dans le secteur industriel*. Available: <https://scrapad.com/fr/blog/le-importance-du-recyclage-dans-le-secteur-industriel/>
- [61] M. M. Thwe and K. Liao, "Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites," *Composites science and technology*, vol. 63, pp. 375-387, 2003.

Annexes

Annexes

Annexe 1 : Machine d'essais de traction Zwick / Roell

❖ Définition :

Une machine d'essais de traction, également appelée appareil d'essais de traction ou machine d'essais universelle est un système d'essais électromécanique qui exerce une force de traction sur un matériau afin de déterminer sa résistance à la traction et son comportement à la déformation jusqu'à la rupture.

Une machine d'essais de traction typique se compose d'un capteur de force, d'une traverse, d'un extensomètre (capteur de déformation), de mâchoires, d'une électronique et d'un système d'entraînement. Elle est commandée par un logiciel d'essai qui permet de définir les paramètres de la machine et réglages de sécurité ; le logiciel permet également d'enregistrer les paramètres d'essai de normes d'essai telles que ASTM et ISO. La force exercée sur la machine et la déformation de l'éprouvette sont enregistrées tout au long de l'essai. La mesure de la force nécessaire pour étirer ou allonger un matériau jusqu'à une déformation permanente ou une rupture aide les concepteurs et fabricants à prédire comment les matériaux se comporteront lorsqu'ils seront utilisés aux fins prévues.

Secteurs d'activité	Universel.
Force d'essai	0,5 kN - 5 kN
Type d'essai	• Essai de traction. • Essai de compression. • Essai de flexion.
Domaine d'utilisation	• Applications d'essais universelles dans la petite plage de force. • Essai de matériau en salle blanche.

❖ Les composants :

1. CAPTEUR DE FORCE

Le capteur de force convertit la force de traction en un signal électrique qui peut être mesuré. Les capteurs de force **Zwick/Roell** garantissent, outre une qualité de produit élevée, une compatibilité sans faille avec tous les composants de nos machines.

2. EXTENSOMETRE

Un extensomètre est un appareil de mesure de la contrainte qui mesure l'allongement d'une éprouvette, également connu sous le nom de mesure de la déformation. La plupart des normes d'essais de traction, telles que l'ASTM et l'ISO, exigent une mesure de la déformation.

3. MÂCHOIRES

Les mâchoires forment le lien mécanique entre l'éprouvette et la machine d'essais de traction. Leur fonction est de transmettre le mouvement de la traverse à l'éprouvette et de transférer la force d'essais générée dans l'éprouvette au capteur de force.

4. TRAVERSE MOBILE

La traverse mobile est essentiellement une traverse pilotée, de manière à permettre son déplacement vers le haut ou vers le bas. Lors d'un essai de traction, la vitesse de la traverse de la machine d'essais est directement liée au taux d'allongement dans une éprouvette.

5. ELECTRONIQUE

L'électronique contrôle les parties mobiles de la machine d'essais de traction. La vitesse de la traverse et donc le taux de charge peuvent être contrôlés par un microprocesseur dans le servo-régulateur (moteur, dispositif de rétroaction et régulateur).

6. SYSTEME D'ENTRAÎNEMENT

Le système d'entraînement alimente le moteur de la machine d'essais de traction en courant de puissance et de fréquence variables, contrôlant ainsi indirectement la vitesse et le couple du moteur.

7. LOGICIEL

Notre logiciel d'essais est une solution particulièrement conviviale, pilotée par un assistant et basée sur Windows, qui permet aux utilisateurs de configurer le système d'essais, de réaliser des essais et d'afficher les résultats.

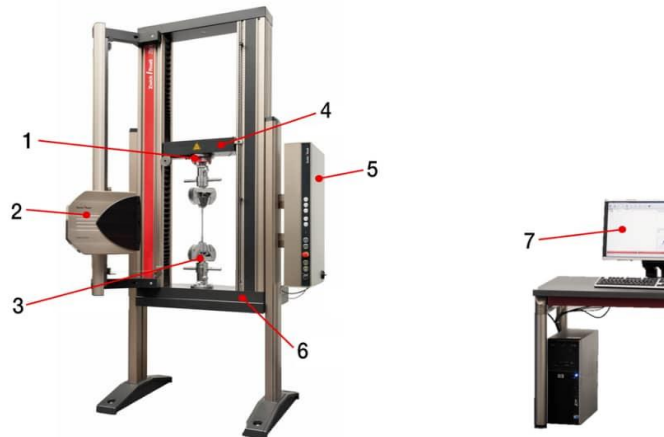


Figure II.17 : les composants de machine

❖ Principe de fonctionnement de la machine d'essai de traction Zwick/Roell :

La machine d'essai de traction Zwick/Roell est conçue pour déterminer les propriétés mécaniques d'un matériau, principalement sa résistance à la traction, son allongement, son module d'élasticité, etc.

Étapes du principe de fonctionnement :

1. Préparation de l'éprouvette :

Une éprouvette normalisée (forme, dimensions) est préparée selon les normes (ISO, ASTM...).

2. Montage de l'éprouvette :

Elle est fixée entre deux mors de serrage (haut et bas). L'un est fixe, l'autre mobile.

3. Application de la force :

Annexes

La traverse mobile descend lentement, appliquant une force de traction progressive sur l'éprouvette.

4. Mesure de la déformation et de la force :

Un capteur de force (cellule de charge) enregistre en continu la force appliquée.

Un extensomètre mesure l'allongement (déformation) de l'éprouvette pendant l'essai.

5. Rupture de l'éprouvette :

Le test continue jusqu'à ce que l'éprouvette se rompe. La machine enregistre le point de rupture, la contrainte maximale, et l'allongement final.

6. Analyse des résultats :

Un logiciel (comme test Xpert III) trace la courbe contrainte-déformation et calcule :

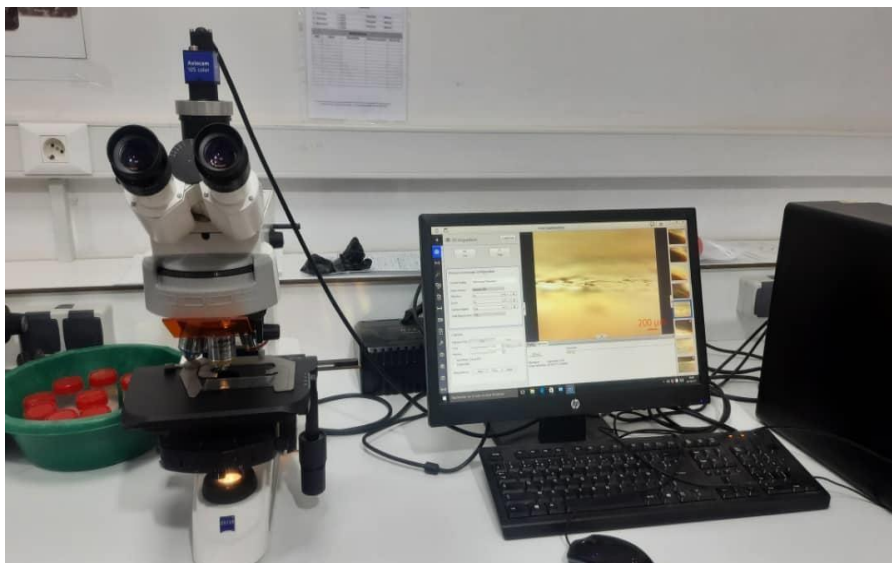
- Limite d'élasticité
- Résistance maximale à la traction
- Allongement à la rupture
- Module d'élasticité

Annexe 2 : La calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

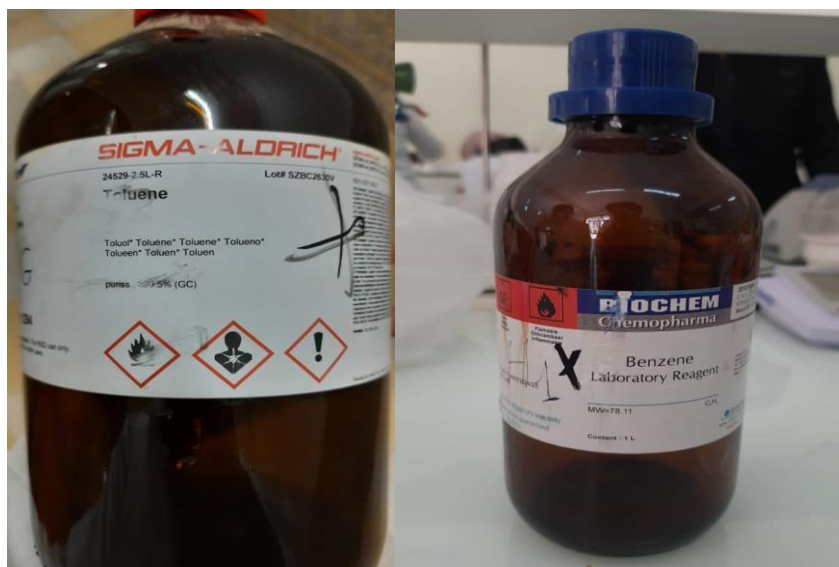
La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) est un puissant outil d'analyse thermique de transformation des produit plastique. Le DSC mesure la quantité de chaleur qui entre ou sort de l'échantillon à l'aide de capteurs de température positionnés dans le bloc chauffant d'un DSC de type « flux thermique ». Un programme de température est appliqué à un échantillon et à un matériau de référence inerte dans la cellule DSC et les capteurs mesurent la différence de température entre eux. Lorsque l'échantillon subit un processus thermique qui dégage de la chaleur, comme la cristallisation, le graphique DSC montre une augmentation du flux de chaleur. Ceci indique un événement exothermique car la température enregistrée par le capteur d'échantillon est supérieure à celle détectée pour la référence. Si l'échantillon subit un événement thermique qui l'amène à absorber plus de chaleur que la référence (comme la fusion), le graphique DSC montre une diminution du flux de chaleur. C'est ce qu'on appelle un par rapport à la référence.

Annexes

Annexe 3 : Microscope optique



Annexe 4 : les solvants



الملحق الوصفي



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة غرداية



عنوان المشروع:

تطوير وتوصيف مادة مركبة أساسها الزجاج والبولي إيثيلين منخفض الكثافة المعاد تدويره لتطبيق مستدام

مشروع لنيل شهادة مؤسسة ناشئة في إطار القرار الوزاري 1275

Élaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de verre et de LDPE recyclés pour une application durable

الاسم التجاري

POLYVER

صورة العلامة التجارية

P  LYVER
GLASS AND PLASTIC RECYCLING

بطاقة معلومات:

حول فريق الاشراف وفريق العمل

1- فريق الاشراف:

فريق الاشراف	
المشرف الرئيسي (01): طويطي فريد	التخصص: هندسة الطرائق

2- فريق العمل:

فريق المشروع	التخصص	الكلية
الطالب : أداود رستم	هندسة كيميائية	العلوم والتكنولوجيا
الطالب : بابا واسماعيل محمد	هندسة كيميائية	العلوم والتكنولوجيا

فهرس المحتويات

❖ **المحور الأول:** تقديم المشروع

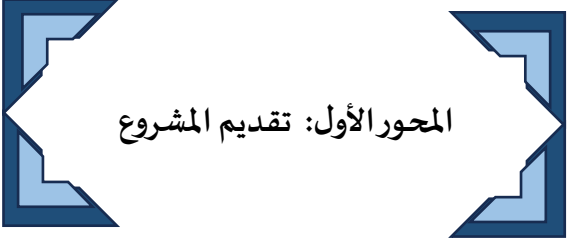
❖ **المحور الثاني:** الجوانب الابتكارية

❖ **المحور الثالث:** التحليل الاستراتيجي للسوق

❖ **المحور الرابع:** خطة الإنتاج والتنظيم

❖ **المحور الخامس:** الخطة المالية

❖ **المحور السادس :** النموذج الاولي التجريبي



المحور الأول: تقديم المشروع

1. فكرة المشروع (الحل المقترح) :

يصنف هذا المشروع ضمن مجال التدوير البيئي وصناعة المواد البديلة، ويهدف إلى إنتاج مادة مركبة جديدة (Composite) تعتمد على مكونين رئيسيين من النفايات الصلبة: الزجاج والبلاستيك، وهما من أكثر المواد استهلاكاً وأبطأها تحللاً في الطبيعة.

انطلقت فكرة المشروع من ملاحظة بسيطة ولكن عميقة، وهي الانتشار الكبير للنفايات الزجاجية والبلاستيكية في البيئة الجزائرية، خصوصاً في الأحياء السكنية والمناطق الصناعية، مما يشكل خطراً بيئياً مستمراً بسبب غياب نظم فعالة لإعادة التدوير. في ظل هذا الواقع، ولدت لدينا فكرة استغلال هذه النفايات وتحويلها إلى مادة جديدة قابلة للاستعمال في مجال البناء والعزل، تطورت الفكرة في إطار مشروع أكاديمي وتجريبي، حيث قمنا بإجراء تحاليل أولية أظهرت إمكانية دمج المادتين بطريقة فعالة لإنتاج منتج صلب بخصائص ميكانيكية مقبولة.

سيتمثل العمل الأساسي لمشروعنا في جمع النفايات الزجاجية والبلاستيكية، معالجتها (غسل، طحن)، ثم دمجها وفق نسب مدروسة باستخدام الضغط أو التسخين، بهدف تشكيل ألواح أو قطع مواد تُستخدم لأغراض وظيفية أو بنيوية. سيتم اختبار هذه المواد داخل مخبر بحث متخصص لضمان استجابتها للمعايير التقنية من حيث الصلابة، المقاومة الحرارية، والمرونة.

يُخطط لتنفيذ المرحلة الأولى من المشروع في ولاية غرداية، داخل ورشة صغيرة مهيأة بالتجهيزات الأساسية. في حال نجاح النموذج الأولي، سيتم توسيع نطاق العمل إلى وحدات إنتاج صغيرة على مستوى مناطق أخرى غنية بالنفايات القابلة للتدوير.

2. القيم المقترحة :

✓ المساهمة في الاقتصاد الدائري من خلال إعادة تدوير النفايات البلاستيكية والزجاجية.

✓ الحد من التأثير البيئي للنفايات الصلبة. صديق للبيئة .

✓ منتج عازل حراري فعال وموفر للطاقة.

✓ تكلفة منخفضة.

✓ محلي، اقتصادي، وسهل التركيب.

✓ مزدوج العزل (حراري وصوتي).

3. فريق العمل

الطالب 1 : أداود رستم تخصص هندسة كيميائية باحث في الهندسة الكيميائية دوره يتمثل في المراقبة التقنية لجودة المنتج. قام بالتسجيل في منصة startup.dz للحصول على علامة لابل شركة ناشئة , كما شارك في عدة دورات تكوينية المنظمة من طرف الحاضنة , متحصل على شهادة مشاركة في ورشة عمل "كيفية صياغة وتقديم مؤسسة ناشئة"

الطالب 2 : بابا واسماعيل محمد تخصص هندسة كيميائية فني مختبر, دوره التصنيع الأولي للمنتج قام بالتسجيل في منصة startup.dz للحصول على علامة لابل شركة ناشئة , كما شارك في عدة دورات تكوينية المنظمة من طرف الحاضنة , متحصل على شهادة مشاركة في ورشة عمل "كيفية صياغة وتقديم مؤسسة ناشئة .

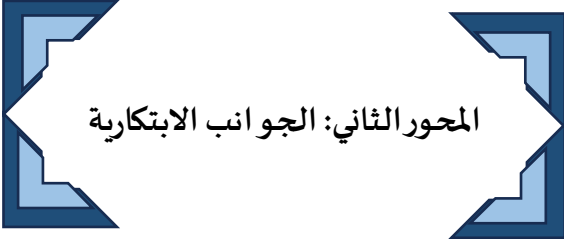
المشرف طويطي فريد أستاذ متخصص في المواد المركبة والبوليمرات دوره هو مساعدة الفريق في البحث التطبيقي وتحليل النتائج

4. أهداف المشروع

- ✓ تطوير وصفة مركبة من LDPE والزجاج المعاد تدويره .
- ✓ اختبار الخواص الميكانيكية والفيزيائية للمادة .
- ✓ إنتاج نماذج أولية .
- ✓ دراسة إمكانيات تسويق المنتج محلياً.
- ✓ تثمين نفايات الزجاج والبلاستيك.
- ✓ تقديم منتج بديل مستدام.
- ✓ تقليل التلوث البيئي.
- ✓ خلق فرص عمل.
- ✓ تطوير مشروع ريادي قائم على البحث العلمي.

5. جدول زمني لتحقيق المشروع :

الأعمال							الاشهر						
							14	12	10	8	6	4	1
1		الدراسات الأولية: اختيار مقر الوحدة الإنتاجية، تجهيز الوثائق المطلوبة	☒	☒									
2		طلب التجهيزات من الخارج		☒	☒								
3		بناء مقر للإنتاج (المصنع)			☒	☒				☒	☒		
4		تركيب المعدات				☒	☒	☒					
5		اقتناء المواد الأولية						☒					
6		بداية إنتاج أول منتج											☒



المحور الثاني: الجوانب الابتكارية

1 طبيعة الابتكارات :

يتمثل الجانب الابتكاري لمشروعنا في ما يلي :

- ✓ استخدام مزيج غير تقليدي من نفايات زجاجية وبلاستيكية لتكوين مادة مركبة .
- ✓ تحسين تقنية خلط وصهر مبتكرة تحقق تجانساً عالياً بين المكونات .
- ✓ تقليل الكلفة مقارنة بالمواد التقليدية ذات نفس الخصائص.
- ✓ رؤية اقتصادية واستراتيجية تهدف إلى تعزيز الإنتاج الوطني وتحقيق الاكتفاء في قطاع مواد العزل الحراري.

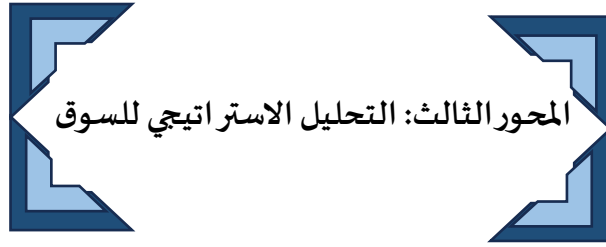
2 مجالات الابتكارات :

تقنياً (مواد البناء المستدامة): من خلال تطوير تركيبة جديدة عازلة.

بيئياً (إعادة التدوير الصناعي): بفضل تجميع النفايات وتقليل التلوث.

اقتصادياً: عبر توفير منتج محلي منخفض التكلفة.

اجتماعياً: من خلال إشراك المجتمع المحلي وخلق فرص عمل



المحور الثالث: التحليل الاستراتيجي للسوق

1. عرض قطاع السوق

• السوق المحتمل

يتمثل في جميع القطاعات التي تحتاج إلى العزل الحراري: البناء (السكنات، المدارس، المستشفيات)، الصناعة، النقل.

أكثر من 70% من المباني في الجزائر تفتقر لنظام عزل حراري فعال، مما يشكل سوقاً ضخمة غير مستغلة بعد.

أيضاً، التوجهات البيئية الحديثة، ودعم السلطات لمشاريع الاقتصاد الدائري، توسّع من السوق المحتمل للمنتجات المعاد تدويرها.

• السوق المستهدف

يستهدف منتجنا :

شركات البناء والمقاولات التي تبحث عن حلول اقتصادية ومحلية للعزل.

أصحاب المشاريع السكنية الفردية خاصة في الجنوب والمناطق ذات الحرارة المرتفعة.

المؤسسات العمومية مثل المدارس والمستشفيات التي تحتاج إلى ترشيد استهلاك الطاقة.

البلديات والمناطق الصناعية التي ترغب في حلول صديقة للبيئة ومستدامة.

2. قياس شدة المنافسة

• من هم المنافسون؟

المصنعون التقليديون لمواد العزل مثل:

الشركات التي تستورد أو تصنع الصوف الزجاجي والبوليستيرين الموسع (EPS).

شركات أجنبية أو وكلاء استيراد متخصصون في مواد العزل.

• نقاط قوتهم:

خبرة طويلة في السوق.

منتجاتهم معروفة ومعتمدة من طرف شركات البناء.

لديهم شبكات توزيع جاهزة.

- نقاط ضعفهم:

ارتفاع أسعار المواد المستوردة بسبب تقلبات السوق وسعر الصرف.

أغلب منتجاتهم غير صديقة للبيئة.

قلة التكيّف مع المناخ المحلي وبعضها غير مناسب للحرارة العالية في الجزائر.

- ماذا يميزنا نحن:

منتج محلي يقلل التكاليف.

صديق للبيئة ومصنوع من نفايات معاد تدويرها.

يوفر حلاً جديداً في سوق يعاني من نقص في الابتكار.

3. استراتيجيات التسويق

(1) تسويق المنتج

التركيز على الخصائص التقنية: فعالية في العزل، خفة الوزن، مقاومة الحرارة.

نسعى لتطوير وتحسين جودة منتجنا حسب متطلبات الزبائن .

(2) تسعير تنافسي

اعتماد سعر أقل من المواد المستوردة بنسبة 20-30%.

نقديم عروض خاصة للمشاريع الكبرى والمؤسسات.

(3) التوزيع

عقد شراكات مع شركات بناء ومقاولات.

البيع المباشر عبر شبكات اجتماعية أو ممثلين محليين.

توفير المنتج عبر نقاط بيع لمواد البناء.

التعامل مع شركات التوصيل .

نوفر خدمة ما بعد البيع .

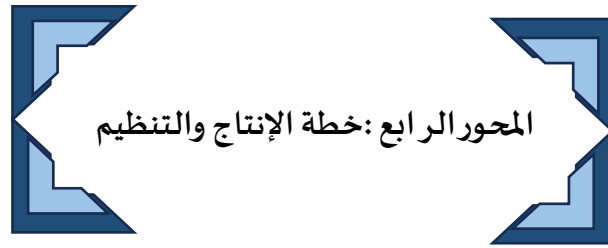
4) الترويج

حملات توعية حول أهمية العزل الحراري والبيئي.

المشاركة في المعارض والصالونات الخضراء.

إعداد فيديوهات تعريفية وتجريبية للمنتج توضح الفرق بينه وبين العوازل التقليدية.

البيع عبر المنصات والمواقع الإلكترونية.



1. عملية الإنتاج

نقوم بإنتاج مادة عازلة حراريًا صديقة للبيئة من خلال سلسلة مراحل تشمل:

- * جمع وفرز نفايات الزجاج والبلاستيك.
- * غسل وتجفيف المواد الخام.
- * طحن الزجاج والبلاستيك إلى حبيبات دقيقة.
- * خلطها بنسب مدروسة في خلاط صناعي.
- * تشكيل الخليط في قوالب مخصصة باستخدام تقنية الضغط الحراري أو القولبة الساخنة.
- * تبريد المنتج، ثم إجراء اختبارات تقنية لضمان جودته (صلابة – عزل – مقاومة الحرارة).
- * تغليف وتخزين الألواح أو الكتل الجاهزة حسب الطلب.

2. التموين

سيتم التزود بالمواد الخام من:

- * جمع النفايات من مراكز الردم التقني ومراكز الفرز.
- * التعاون مع الجمعيات البيئية ومؤسسات جمع النفايات المحلية.
- * اتفاقيات مع البلديات أو شركات نظافة لجمع وفرز الزجاج والبلاستيك.
- * شراء مواد ثانوية (مكملات صناعية، عبوات، مواد تغليف) من موردين محليين.

2. اليد العاملة : في المرحلة الأولى (وحدة صغيرة أو تجريبية)، نحتاج إلى

العمال	العدد	المهام
مسؤول الجمع والفرز	1	لإشراف على جمع نفايات الزجاج والبلاستيك من المزودين أو مراكز الردم.
عمال تقنيين في المعالجة والتصنيع	2	تشغيل آلات الغسل، الطحن، الخلط، التشكيل. * مراقبة درجات الحرارة، الضغط، ونسب الخلط أثناء التصنيع.
مهندس مخبر لاختبار الخصائص الفيزيائية والكميائية	1	إجراء اختبارات للمنتج النهائي: العزل الحراري، مقاومة الحرارة، الكثافة... * تحليل جودة المواد الخام قبل الاستعمال. * تطوير وتحسين تركيبة المادة عند الحاجة
مهندس إنتاج	1	* الإشراف العام على مراحل التصنيع. * اقتراح حلول تقنية لتحسين الإنتاج وتقليل التكاليف.
إداري/مسؤول مشتريات	1	متابعة الفواتير وطلبات الشراء. * التفاوض مع الموردين بشأن المواد الثانوية (مواد تغليف، وقود، مستلزمات تشغيل). * إدارة ملفات الموردين والعملاء
عامل صيانة الآلات	1	الفحص الدوري للآلات (طاحونة، خلاط، قوالب...).

* معالجة الأعطال التقنية البسيطة فوراً و التبليغ عن الأعطال الكبرى و اقتراح حلول.		
قطيع المنتج حسب الأبعاد المطلوبة. * تغليف الألواح أو الكتل بمواد واقية. * وضع ملصقات تحديد المنتج والكمية.	2	عامل التعبئة والتغليف
* استقبال وتسجيل المنتجات النهائية. * مراقبة المخزون (دخول وخروج). * إعداد تقارير شهرية حول مستويات التخزين.	1	مسؤول المخزن
مسك الدفاتر المالية والميزانية العامة. * حساب تكاليف الإنتاج والربحية. * إعداد الملفات الجبائية والتقارير المالية. * متابعة المعاملات البنكية والدفع للموردين	1	محاسب
تنظيم عمليات نقل وتسليم الطلبات. * التواصل مع شركات نقل أو تنظيم نقل داخلي.	2	مسؤول التوزيع

4. الشراكات الرئيسية

شراكات استراتيجية نخطط لها تشمل:

* مؤسسات جمع النفايات وفرزها (الضمان تموين مستمر).

* شركات بناء ومقاولات كزبائن رئيسيين.

* جمعيات بيئية للمساهمة في الحملات التوعوية والتزويد بالمواد الخام.

* حاضنات ومراكز دعم المؤسسات الناشئة لمرافقة المشروع تقنيًا وإداريًا.



المحور الخامس: الخطة المالية PLAN FINANCIER

1. التكاليف والأعباء

أ) التكاليف الاستثمارية الأولية (تكاليف الانطلاق):

البند	التكلفة (دج)
آلات الطحن والخلط والتشكيل	2,500,000 دج
معدات التحليل (مخبر)	800,000 دج
تجهيزات التعبئة والتغليف	400,000 دج
تأهيل المحل وورشنة الإنتاج	600,000 دج
شاحنة صغيرة للنقل	1,200,000 دج
مصاريف قانونية وإدارية (تسجيل، ترخيص...)	100,000 دج
مواد أولية أولية (نفایات زجاج وبلاستيك)	200,000 دج
أدوات مكتبية وإدارية	100,000 دج
مجموع التكاليف الاستثمارية	5,900,000 دج

ب) التكاليف التشغيلية الشهرية (الأعباء الدائمة):

البند	القيمة (دج / شهر)
أجور العمال (6 أشخاص)	600,000 دج
الكهرباء والماء	80,000 دج
الوقود والنقل	100,000 دج
شراء مواد مساعدة (تغليف، مكملات...)	120,000 دج
صيانة وتجديد معدات	40,000 دج
مصاريف تسويق واتصال	30,000 دج
مصاريف إدارية وكراء	150,000 دج
مجموع الأعباء الشهرية	1,120,000 دج

2. رقم الأعمال المتوقع

المنتج: لوحات عزل حراري بمقاسات 1 م²

سعر البيع للوحدة: 700 دج (سعر تنافسي).

الإنتاج المتوقع شهرياً: 2,000 وحدة (لوحة).

رقم الأعمال الشهري = $700 \times 2,000 = 1,400,000$ دج

رقم الأعمال السنوي (خلال 12 شهر) = $16,800,000$ دج

3. جدول حسابات النتائج المتوقعة (1 سنة)

البند	القيمة (دج)
رقم الأعمال	16,800,000
الأعباء التشغيلية السنوية	13,440,000
فائض الاستغلال (الربح التشغيلي)	3,360,000
الضرائب والرسوم (تقريباً 10%)	336,000
الربح الصافي المتوقع	3,024,000 دج

نسبة الربحية الصافية = 18% تقريباً (نسبة جيدة في السنة الأولى)

4. خطة الخزينة

مثال مبسّط للشهور الثلاثة الأولى:

الشهر	المداديل	المصاريف	الرصيد الشهري	الرصيد التراكمي
جانفي	0 (بداية)	5,900,000 (معدات + كراء + تأسيس)	5,900,000-	5,900,000-
فيفري	1,400,000	1,120,000	280,000+	5,620,000-
مارس	1,400,000	1,120,000	280,000+	5,340,000-

◆ ملاحظة: سيتم توازن الخزينة تدريجيًا خلال أول سنة، مع بلوغ نقطة التعادل بين الشهر السادس والثامن.

-إمكانية تحسين الأرباح برفع الإنتاج أو تقليل التكاليف بعد السنة الأولى.

5. طرق التمويل

نسعى في بداية مشروعنا إلى تنويع مصادر التمويل بحيث يمكن تمويل الانطلاقة من خلال:

-منحة مؤسسة ناشئة.

-قرض مصغر.

- شريك مالي.



المحور السادس : النموذج الأولي التجريبي

المحور السادس : النموذج الاولى التجريبي

بداية تمّ تصنيع منتج نصف نهائي باستخدام مزيج مدرّوس بدقّة من البلاستيك المعاد تدويره والزجاج المطحون

و النموذج الأوّل التجريبي عبارة عن لوحة عازلة للحرارة "Polyver" يتمّ تصنيعه ضمن قالب قياسي بأبعاد

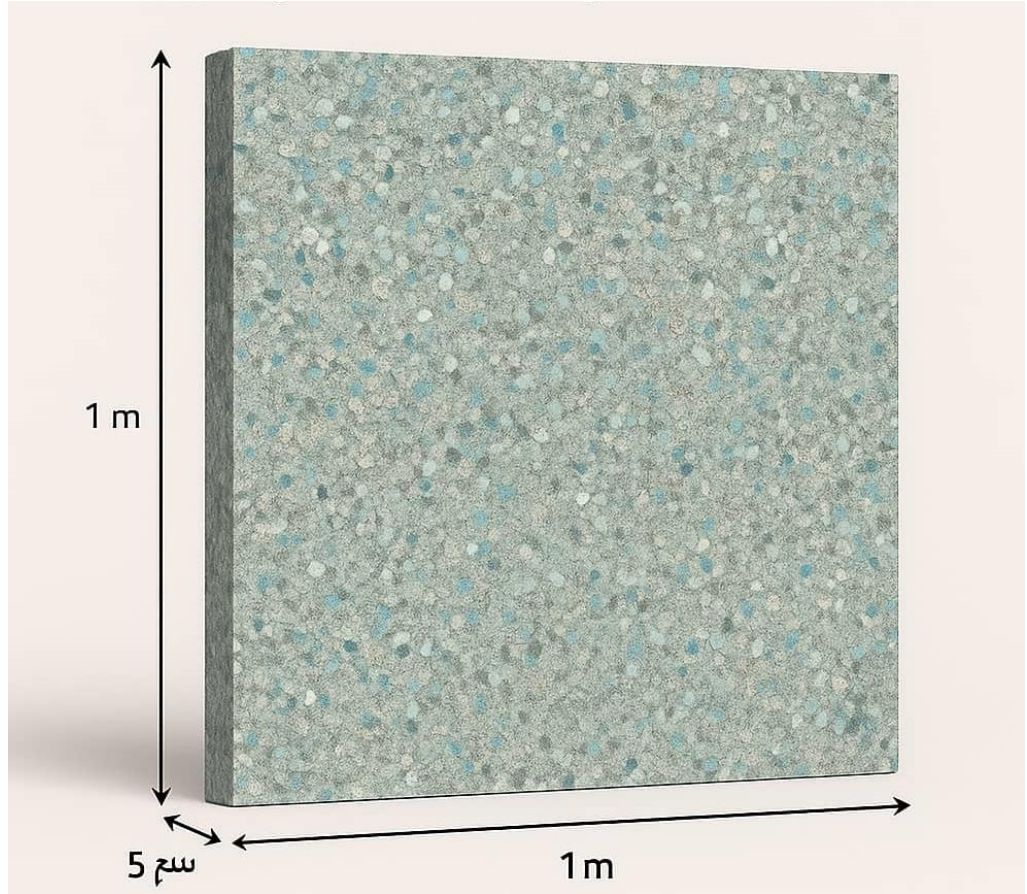
100 سم × 100 سم × 5 سم (يمكن تعديل أبعاد الألواح حسب متطلبات الزبون)

يتمّ لاحقاً قياس قدرات العزل الحراري ومثانة الألواح مع مقاومة للتآكل في ظروف مختلفة ضمن مختبرات

مختصة للتأكد من مطابقتها للمواصفات المرجوة في تطبيقات البناء الحديث

. هذه الخطوة تمهّد لاحقاً للإنتاج على نطاق تجاري ضمن خطّ إنتاج صغير في بداية المشروع.

النموذج الاولى التجريبي عن المنتج النهائي :



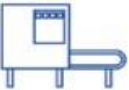
المنتج النصف النهائي :





نموذج العمل التجاري BMC



الشركاء الرئيسيون  شركات بناء ومقاولات * جمعيات بيئية. بلديات. شركات جمع النفايات. مراكز البحث. حاضنات الأعمال.	الأنشطة الرئيسية  جمع وفرز المواد. التصنيع. مراقبة الجودة. التسويق والتوزيع.	القيمة المقترحة  ألواح عزل حراري قوية وعازلة للتسريب. مادة مركبة صديقة للبيئة. منخفضة التكلفة. خفيفة الوزن. مقاومة للعوامل الجوية. سهولة التركيب والنقل.	علاقات العملاء  خدمة ما بعد البيع. عقود توريد مستمرة. دعم فني و تقني في التركيب والتنصيب. علاقات عمل مباشرة مع الشركات الإنشائية. ضمان على المنتجات للتأكد من جودتها على المدى الطويل. إنشاء علاقة مع الزبائن عبر المواقع الإلكترونية لتسهيل التواصل .	شرائح العملاء  البلديات. شركات البناء التي تنقذ مشاريع بناء صغيرة وكبيرة. المقاولون الصغار. الأفراد الراغبون في بناء منازل صديقة البيئة السلطات التي تشرف على مشاريع سكنية مدعّمة.
هيكل التكاليف  تكاليف التجهيز و المعدات والآلات، أدوات مكتبية وإدارية. الأجور، مصاريف تسويق واتصال النقل. مصاريف الكهرباء و الماء. الصيانة.	الموارد الرئيسية  اليد العاملة. معدات الإنتاج. المواد الخام المعاد تدويرها. المعرفة التقنية.		القنوات  العروض الميدانية، المعارض البيئية، وسائل التواصل الاجتماعي، الشراكات مع البلديات.	مصادر الدخل  بيع الألواح والمنتجات النهائية، عقود طويلة المدى، مشاريع شراكة.



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة غرداية
حاضنة أعمال جامعة غرداية



رقم: 285 / ح.أ.ج.غ/2025
شهادة توظيف مشروع مبتكر وفق القرار 008 المعدل والمتمم للقرار 1275

أنا الممضي اسفله السيد : د/ طالب احمد نور الدين

مسير حاضنة الاعمال : جامعة غرداية

المقر الاجتماعي/ العنوان : المنطقة العلمية ، ص ب 455 ، غرداية ، 47000 ، الجزائر

بتاريخ : 2025/04/10

رقم علامة الحاضنة : 1004253146

طبيعة المشروع: مؤسسة ناشئة

أشهد أن الطالب(ة) / الطلبة التالية أسماؤهم:

الاسم واللقب	الطور الدراسي	التخصص	الكلية
رستم أداود	M2	هندسة كيميائية	العلوم والتكنولوجيا
باباواسماعيل محمد	M2	هندسة كيميائية	العلوم والتكنولوجيا

تحت إشراف الأستاذ(ة)/الأستاذة التالية أسماؤهم:

الاسم واللقب	الرتبة	التخصص	الكلية
فريد طويطي	أستاذ محاضر	هندسة طرائق	العلوم والتكنولوجيا

تم توظيفه على مستوى حاضنة أعمال جامعة غرداية - بمشروع تحت اسم:

Préparation d'un matériau composite à base de verre et plastique recyclé.

خلال السنة الجامعية: 2025/2024

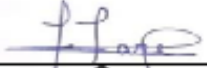
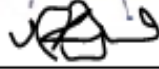
سلمت هذه الشهادة بطلب من المعني للإدلاء بها في حدود ما يسمح به القانون .

حرر في غرداية بتاريخ: 2025/06/18

مدير الحاضنة



Autorisation d'impression finale d'un mémoire de master

	Nom et prénom	Signature
Examineur 1	FENNICHE Fares	
Encadrant	TOUAITI Farid	
Co-encadrant	/	/

Soussigne Melle: RAACHE Imane

Président de jury des étudiant (s): ADDAOU Dostom , BABAOUSMAIL Mohammed

Filière :Génie des procédés : Spécialité :Génie chimique

Thème : Élaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de verre et de
LDPE recyclé pour une application durable

Autorise le (s) étudiant (s) mentionné (s) ci-dessus à imprimer et déposer leur (s) manuscrit final
au niveau du département.

Ghardaïa le: 14/07/2025

Président de jury



Le chef de département

