



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département de génie mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Réf. : [Entrez la référence du document](#)

Présenté et soutenu par :

Halima TERCHAG

Le : mercredi 07 juillet 2019

Caractérisation mécanique d'un matériau obtenu par le recyclage des déchets de polystyrène expansé

Jury :

Dr.	Nora BOULTIF	MCB	Université de Biskra	Président
Dr.	Tahar MASRI	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Tarek DJOUDI	MAA	Université de Biskra	Examineur

REMERCIEMENT

Tout d'abord on remercie DIEU le tout les puissants qui nous a donné, le courage et l'ambition pour réaliser ce modeste travail.

Je tien a remercié mon encadreur de son aide et ses encouragements durant la réalisation de mon travail. Il nous a orientés vers le succès avec ses connaissances en partageant nos idées et sans oublier ses encouragements, et sa présence à tout moment : Dr. Tahar MASRI.

Nous remercions également tous les membres du jury, L'examineur de ce travail Monsieur Tarek DJOUDI et le président de jury, Madame Nora BOULTIF.

Merci beaucoup à tous les employés de l'hall technologique et à tous les techniciens et surtout à monsieur Sadok SEDRATI.

Un merci spécial à tous les Enseignants de la Faculté des sciences et technologies, en particulier les Enseignants du département de génie mécanique.

Et tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à réalisation de ce travail.

Je dédie ce mémoire :

A ma chère mère,

A mon cher père,

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mon frère, Mounir.

A mes sœurs, Zineb et Nadjet.

A ma sœur, Widad et son mari.

A mes chères amies : Amel ABDEDDAIM et Maroua FERHAT.

A tous mes autres amies.

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

Dédicace

Résumé

Résumé

Ce travail présente une étude de caractérisation expérimentale d'un matériau obtenu par le recyclage des déchets de polystyrène expansé et un matériau composite à base de ces déchets, utilisé comme matrice, et des déchets de palmier dattier, utilisé comme renfort. Dans l'élaboration des matériaux deux techniques de recyclage ont été utilisées, la fusion et le thermo-pressage de la matière. Des essais de traction ont été réalisés pour la détermination les propriétés mécaniques des matériaux élaborés tel que, le module de Young, la résistance à la traction et le coefficient de Poisson. Les résultats ont montrés que le recyclage par thermo-pressage améliore les propriétés mécaniques des matériaux. De plus, l'augmentant de temps de maintien améliore ces propriétés.

Les mots clés: Recyclage, polystyrène expansé, matériau composite, déchets palmier dattier, fusion, thermo-pressage, caractérisation mécanique.

الملخص

يقدم هذا العمل دراسة وصفية تجريبية لمواد تم الحصول عليها عن طريق إعادة تدوير نفايات البوليسترين الموسع والمواد المركبة على أساس هذه النفايات ، تستخدم كمصفوفة ، ونفايات نخيل التمر ، المستخدمة كتعزيز. في إعداد المواد المركبة، تم استخدام طريقتين لإعادة التدوير وهما ذوبان وضغط الم ادة حراري تم إجراء اختبارات الشد لتحديد الخواص الميكانيكية للمواد الم تحصل عليها، مثل معامل المرونة الطولي و مقاومة الشد ومعامل بواسون. أظهرت النتائج أن إعادة التدوير بالضغط الحراري تعمل على تحسين الخواص الميكانيكية للمواد. بالإضافة إلى ذلك زيادة زمن الانتظار يحسن هذه الخصائص.

الكلمات المفتاحية : إعادة التدوير ، البوليسترين الموسع ، المواد المركبة ، نفايات النخيل ، الذوبان ، الضغط الحراري ، الخصائص الميكانيكية.

Abstract

Abstract

This work presents an experimental characterization study of a material obtained by the recycling of expanded polystyrene waste and a composite material based on this waste, used as a matrix, and waste of date palm, used as reinforcement. In the elaboration of materials two recycling techniques were used, melting and thermo-pressing of the material. Tensile tests were carried out for the determination of the mechanical properties of the elaborated materials such as Young's modulus, tensile strength and Poisson's ratio. The results showed that recycling by thermo-pressing improves the mechanical properties of the materials. In addition, increasing the hold time improves these properties.

Key words: Recycling expanded polystyrene, composite material, date palm waste, melting, thermo-pressing, mechanical characterization.

Liste des figures

Table des matières

Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux	XIV
Introduction générale.....	1
Recherche bibliographique sur le recyclage des déchets.	3
I Recherche bibliographique sur le recyclage des déchets	4
I.1 Déchets	4
I.2 Classification des déchets.....	4
I.2.1 Par leur nature	4
a) Les déchets inerties	4
b) Les déchets organiques	5
c) Les déchets banals.....	5
d) Déchets dangereux (déchets spéciaux)	5
e) Déchets ultimes	5
I.2.2 Par leur origine	5
a) Les déchets industriels	5
b) Les déchets agricoles	6
c) Les déchets industriels inertes	6
d) Déchets hospitaliers (DH), Déchets d'activités de soins (DAS) et déchets infectieux	7
e) Déchets d'activités de soins à risque infectieux (DASRI).....	7
f) Les déchets radioactifs	7
g) Les déchets ménagers et assimilés	8
I.3 Composition physique des DMA	8
I.3.1 Déchets putrescibles.....	9
I.3.2 Papier et carton.....	9

Liste des figures

I.3.3	Les déchets textiles.....	9
I.3.4	Verre.....	10
I.3.5	Métaux.....	10
I.3.6	Plastiques.....	10
a)	Déchets plastiques industriels	11
b)	Les déchets plastiques de post-consommation	11
c)	Les déchets commerciaux ou de distribution.....	11
d)	Les déchets électriques et électroniques	12
e)	Les déchets ménagers	12
f)	Les déchets du bâtiment et des travaux publics	12
I.4	Évolution de la composition des DMA en Biskra 2014	12
I.4.1	Zone aride.....	12
I.5	La gestion des déchets ménagers.....	14
I.5.1	La collecte des déchets	14
I.5.2	Le tri des déchets.....	15
I.5.3	Le traitement	15
a)	La Réduction à la source :.....	15
b)	Le Réemploi ou récupération.....	15
c)	Le Recyclage.....	15
d)	La Valorisation.....	16
e)	L'élimination.....	16
I.6	Recyclage des matières plastiques.....	16
I.6.1	Recyclage primaire ou ré-extrusion	16
I.6.2	Recyclage secondaire ou mécanique.....	17
I.6.3	Recyclage tertiaire ou chimique.....	17
a)	La pyrolyse.....	17

Liste des figures

b) L'hydrogénation.....	17
c) La gazéification.....	17
I.6.4 Recyclage quaternaire ou incinération	17
I.7 Les contraintes du recyclage.....	18
a) Contraintes liées à la présence de différents grades de polymères et de composés toxiques	18
b) Contraintes liées à la présence d'impuretés	18
c) Contraintes liées à la dégradation des polymères à recycler.....	18
I.8 Solutions aux problèmes de l'utilisation des polymères recyclés	18
I.9 Avantages et inconvénients du recyclage	19
I.9.1 Les avantages du recyclage	19
I.9.2 Les inconvénients du recyclage.....	20
I.10 Les différents procédés de transformation du plastique	20
I.10.1 Calandrage.....	20
I.10.2 Thermoformage	22
I.10.3 Extrusion	23
a) Extrusion gonflage	24
b) Extrusion Soufflage	24
c) Moulage par Injection	25
I.10.4 Recyclage par fusion de la matière	26
I.10.5 Le thermo-pressage	26
a) Le Pressage à chaud	27
I.11 Généralité sur les matériaux composites	29
I.11.1 La matrice polymérique	29
a) Les thermodurcissables	30
b) Les thermoplastiques	30

Liste des figures

I.12	Le polystyrène (PS) et PS Expansé	32
I.12.1	Sources du polystyrène post utilisation.....	33
a)	Polystyrène postindustriel.....	33
b)	Polystyrène post-commercial.....	33
c)	Le polystyrène post-consommation	33
I.12.2	Recyclage du polystyrène expansé.....	33
II	Matériaux et méthodes expérimentales.....	36
II.1	Procédés d'élaboration du Matériau	36
II.1.1	Recyclage et moulage par fusion	36
a)	Le Moule et support	36
b)	Résistances électrique	37
c)	Matériau obtenu par recyclage et moulage par fusion	38
d)	Eprouvette d'essai de traction.....	39
II.1.2	Recyclage et moulage par thermo-pressage de PSE	39
a)	Le moule	39
b)	Le four électrique.....	40
c)	Opération de thermo-pressage	40
d)	Matériau obtenu par recyclage et moulage par thermo-pressage.....	42
II.1.3	Matériau composite à base de déchets de PSE et de déchets de palmier dattier	42
II.2	Méthode de caractérisation expérimentale	44
II.2.1	Essai de traction	44
a)	Eprouvettes d'essai	44
b)	Principe de l'essai de traction	45
c)	Essai expérimental	47
II.2.2	Types de ruptures des matériaux.....	49
a)	Rupture des polymères.....	49

Liste des figures

b) Matériaux fragiles	49
c) Matériaux ductiles avec seuil d'écoulement	50
d) Matériaux ductiles sans seuil d'écoulement	50
e) Matériaux caoutchouc	51
Caractérisation expérimentale des matériaux	52
III Caractérisation expérimentale des matériaux	53
III.1 Matériaux 100% polystyrène expansé recyclé	53
III.1.1 Propriétés mécanique du matériau obtenu par fusion	53
a) Courbe contrainte déformation	53
b) Module d'élasticité.....	55
c) Résistance à la traction.....	56
d) Coefficient de Poison	56
III.1.2 Propriétés mécanique du matériau obtenu par thermo-pressage	57
a) Courbe contrainte déformation	58
b) Module d'élasticité.....	59
c) Résistance à la traction.....	59
d) Coefficient de Poison	60
III.2 Matériaux composite à base de PSE recyclé et de déchets de palmier dattier	61
III.2.1 Propriétés mécanique du matériau composite obtenu par thermo-pressage	61
e) Courbe contrainte déformation	61
f) Module d'élasticité.....	62
g) Résistance à la traction.....	63
h) Coefficient de Poison	63
Conclusion générale	66
Références bibliographiques	68

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1: Déchets hospitaliers.	7
Figure I. 2: Déchets putrescibles.....	9
Figure I. 3: Déchets textiles.	10
Figure I. 4: Composition moyenne annuelle des DMA à Biskra (zone aride) en 2014.	13
Figure I. 5: Quantité des compositions de DMA en 2008-2009 et 2014.	14
Figure I. 6: Gestion et recyclage des déchets.....	18
Figure I. 7: Principe de Calandrage.	21
Figure I. 8: Schématisation d'une chaîne de calandrage [27].....	22
Figure I. 9: Procédé de thermoformage.	22
Figure I. 10: Type d'extrudeuse [30].	24
Figure I. 11: Principe d'extrusion gonflage.	24
Figure I. 12: Principe d'extrusion soufflage.	25
Figure I. 13: Principe de moulage par injection.....	25
Figure I. 14: Cycles de pressage.	28

Chapitre II

Figure II. 1: Moule métallique démontable.	37
Figure II. 3: Résistance électrique.	37
Figure II. 4: Recyclage et moulage de PSE par fusion.	38
Figure II. 5: Plaques obtenues par recyclage et moulage par fusion : (a) F-1-1, (b)F-1-2,	38
Figure II. 6: Géométrie d'une éprouvette de traction normalisée.	39
Figure II. 7 : Eprouvette d'essai de traction : (a) Originale, (b) Colorée.	39
Figure II. 8: Le moule Métallique.....	40
Figure II. 9: Four troué utilisé dans le thermo-pressage.....	40
Figure II. 10: Les étapes de thermo-pressage.	41

Liste des figures

Figure II. 11: Eprouvettes de traction obtenues par le thermo-pressage.	42
Figure II. 12: Fibre des feuilles utilisées comme renfort.	43
Figure II. 13: Plaque composite PSE/fibres de palmier dattiers	43
Figure II. 14: Type des éprouvettes d'essai de traction.	44
Figure II. 15: Eprouvette dans la machine de traction.....	45
Figure II. 16: Essais de traction.	46
Figure II. 17: La courbe contrainte/déformation.	47
Figure II. 18: d'essai de traction.....	47
Figure II. 19: des éprouvettes avec le point de mesure de coefficient de Poisson.	48
Figure II. 20: Courbes de traction types des plastiques[46].	49

Chapitre III

Figure III. 2: Courbes contrainte/déformations des matériaux 100% PSE obtenus par fusion.	54
Figure III. 3: Courbes contrainte/déformation typiques des matériaux obtenus par fusion. ..	54
Figure III. 4: Modules d'élasticités des matériaux PSE obtenus par fusion.	55
Figure III. 5: Les contraintes maximales des matériaux PSE obtenus par fusion.	56
Figure III. 6 : Les coefficients de Poisson des matériaux PSE obtenus par fusion.	57
Figure III. 7 : Courbes Contrainte/déformation des matériaux PSE obtenus par thermo- pressage.	58
Figure III. 8 : Courbes typiques des matériaux PSE obtenus par thermo-pressage.....	58
Figure III. 9 : Module d'élasticité des matériaux en PSE obtenus par thermo-pressage.....	59
Figure III. 10 : Résistances des matériaux en PSE obtenus par thermo-pressage.....	59
Figure III. 11: Coefficients des matériaux en PSE obtenus par thermo-pressage.	60
Figure III. 12: Courbe contrainte/déformation des matériaux composites obtenus par thermo- pressage.	61
Figure III. 13: Courbes types des matériaux composites.	62

Liste des figures

Figure III. 14: Module d'élasticité des matériaux PSE et des composites PSE/Fibres de palmier dattier.	62
Figure III. 15: Résistance à la traction du matériau PSE et des composites PSE/Fibres de palmier dattiers	63
Figure III. 16: Coefficient de Poisson du matériau PSE et des composites PSE/Fibres de palmier dattiers.	64

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1 : Composition globale des déchets entrants CET D'El Outaya [17].....	13
Tableau I. 2: Caractéristique des résines thermodurcissables [37].....	30
Tableau I. 3: Caractéristiques physiques des polymères thermoplastiques [43]......	31
Tableau I. 4: Caractéristiques mécaniques des polymères thermoplastiques [41].	32

Chapitre II

Tableau II. 2: Configuration des matériaux élaborés par fusion.	38
Tableau II. 3: Dimensions normalisées de l'éprouvette de traction[36].	39
Tableau II. 4: Configuration des matériaux élaborés par le thermo-pressage.....	41
Tableau II. 5: Proportion massique entre le renfort/matrice.	43
Tableau II. 6: Dimensions de différents types d'éprouvettes de traction selon la norme NF EN ISO 527[46].	45

Chapitre III

Tableau III. 2 : Différents cas étudiés par le recyclage par fusion.....	53
Tableau III. 3: Tableau récapitulatif des propriétés des matériaux des PSE obtenus par fusion.	57
Tableau III. 4: Conditions du thermo-pressage des déchets de PSE.....	57
Tableau III. 5: Tableau récapitulatif des propriétés des matériaux des PSE obtenus par thermo-pressage.	60
Tableau III. 6: Composition des matériaux composites élaborés.....	61
Tableau III. 7: Récapitulation des propriétés mécaniques des matériaux PSE recyclé et les composite PSE/Fibres de palmier dattier.	64

Introduction générale

Introduction générale

L'accroissement démographique, le mode de vie (apparition des supermarchés, usages des emballages plastiques dans les aliments...) et la forte demande en infrastructure (logements, routes, nourritures...) s'accompagnent d'une dégradation de l'environnement de façon alarmante. Cette dégradation est incompatible avec le développement durable conseillé par nos nations. L'une des causes de cette dégradation est la prolifération des déchets plastiques d'emballage (sachets, emballage en polystyrène,...) rejetés dans la nature par leurs utilisateurs. Ces plastiques sont omniprésents dans notre vie. Après l'usage des produits, ces déchets deviennent des déchets volumineux par rapport à leur poids. Ils occupent un volume important dans les points de collecte et autres installations de gestion de déchets dont les centres d'enfouissements techniques et les décharges. Leur dissémination dans la nature est durable et inesthétique car ils sont non biodégradables par le fait que leur durée de vie peut atteindre jusqu'à 500 ans environ.

Les activités agricoles et agro-industrielles aussi génèrent des quantités importantes de déchets qui constituent une nuisance certaine pour l'environnement et un gaspillage de matière organique utile. C'est déchets naturelles sont appelés les biomasses, qui sont obtenue à partir de résidus agricoles ou de forêts. L'utilisation appropriée de la biomasse peut être respectueuse de l'environnement car elle permettra non seulement de résoudre le problème de l'élimination, mais aussi de créer des produits à valeur ajoutée à partir de cette biomasse. C'est résidus peuvent être utilisées pour produire de différents matériaux et des bioénergies. La biomasse est une source d'énergie renouvelable, son utilisation est en augmentation constante et continu probablement à augmenter à l'avenir.

Pour être en phase avec les objectifs et les grandes lignes que devrait être le monde futur autour des axes de protection de l'environnement et du développement durable que cette étude a été initiée. Pour résoudre ces problèmes environnementaux, de nombreuses réflexions sont axées sur la conception de nouveaux matériaux. De nos jours le recyclage des déchets plastiques fait l'objet de nombreuses études. Plusieurs méthodes d'utilisation de ces déchets, plastiques et végétale, pour la conception de nouveaux matériaux font également l'objet de nombreuses études.

L'objectif général visé par ce travail est de résoudre un problème environnemental en valorisant les déchets industriels, déchets d'emballages de polystyrène expansé, et les déchets naturels locaux, déchets de palmier dattier, par la conception des matériaux utilisables et

Introduction générale

respectant les exigences économiques et environnementales. Les objectifs spécifiques visés pour atteindre cet objectif général sont :

- Établir un procédé de recyclage des déchets pour l'élaboration des matériaux homogène et composite.
- Caractériser mécaniquement les matériaux élaborés

Dans ce contexte, les déchets de polystyrène expansé et les déchets locaux de palmier dattier sont recyclés par plusieurs techniques pour obtenir des nouveaux matériaux avec des nouvelles applications.

Le présent travail est réparti sur deux parties essentielles. La première partie est une synthèse bibliographique sur les déchets industriels et naturels. Des notions de base sur les déchets, leurs types et leurs gestions sont présentées, suivi d'une description sur les méthodes de recyclages utilisées.

La deuxième partie comprend deux axes. Le premier axe décrit les étapes suivies pour l'élaboration des matériaux (100% polystyrène expansé recyclé et matériau composite PSE/fibres de palmier dattier) ainsi les différentes méthodes utilisées pour le recyclage des déchets. Le deuxième axe décrit la méthode de caractérisation des matériaux élaborés suivi par une étude expérimentale qui récapitule les résultats obtenus. Une étude comparative des propriétés mécaniques des matériaux a été présentée. Le manuscrit se termine par une conclusion générale synthétisant les résultats obtenus en proposant des perspectives relatives à l'étude réalisée.

Chapitre I

Recherche bibliographique sur le recyclage des déchets.

Chap. I : Recherche Bibliographique

I Recherche bibliographique sur le recyclage des déchets

Ce chapitre représente des définitions générales sur les déchets et leurs différents types. D'autres points relatifs aux déchets, telle que leurs compositions, leurs modes et procédés de recyclage seront abordés suivi par l'identification des impacts des déchets sur l'environnement et la santé humaine.

I.1 Déchets

La principale définition d'un déchet est un objet qui n'a pas ou plus d'utilité et dont le propriétaire veut se débarrasser. Ainsi, Boyer explique que le mot déchet vient de déchoir, qui signifie qui perd de la valeur. Par conséquent un déchet peut prendre différentes formes. D'une manière légale on trouve la définition suivante selon la loi cadre du 15 juillet 1975.

« tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon » [1].

I.2 Classification des déchets

L'article 5 de la loi algérienne 01-19 donne la classification suivante des déchets:

- Les déchets ménagers et assimilés;
- Les déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux;
- Les déchets inertes.

Dans le décret n° 06-104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets industriels, y compris les déchets spéciaux dangereux, la classification la plus répandue à ce jour, c'est celle qui propose de séparer les constituants du déchet suivant les deux grandes catégories suivantes [2] :

I.2.1 Par leur nature

a) Les déchets inertes

Les déchets dits « inertes » font partie des déchets non dangereux, mais sont classés séparément et définis par la négative : ne brûlent pas, ne se décomposent pas, ne produisent aucune réaction ni chimique ni physique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas les matières avec lesquelles ils entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner des

Chap. I : Recherche Bibliographique

atteintes à l'environnement ou à la santé humaine. Il s'agit presque exclusivement de déchets minéraux, issus essentiellement du secteur du bâtiment et des travaux publics. Par contre, tous les minéraux ne sont pas inertes, ainsi les déchets non dangereux ne sont pas nécessairement inertes [3].

b) Les déchets organiques

Ces déchets sont composés de matière organique caractérisée par la présence de carbone issu d'organismes vivants, végétaux ou animaux. Ces déchets peuvent subir un phénomène de biodégradabilité. Ce caractère fermentescible leur confère un caractère évolutif dans le temps. Ils ont des origines diverses : aliments, espaces verts ... Les ordures ménagères par exemple contiennent une fraction fermentescible représentant environ 30% de leur poids humide [4].

c) Les déchets banals

Ces déchets regroupent les déchets municipaux au sens large du terme et les banals des entreprises qui peuvent être valorisables par recyclage, par fermentation ou par incinération avec récupération ni toxiques ni dangereux [4].

d) Déchets dangereux (déchets spéciaux)

Ce sont des déchets qui contiennent en quantités variables des éléments toxiques pour la santé humaine et/ou l'environnement. Cette qualité ne présume pas de leur origine, qui peut être domestique, industrielle ou agricole.[3]

Ces déchets comme (Restes de peinture et de colles, piles, résidus de produits d'entretien, déchets chimiques et huiles de vidange principalement), produits en petites quantités par les ménages, de l'ordre de 2 kg par an et par habitant [5].

e) Déchets ultimes

Il s'agit des déchets qui ne sont plus valorisables, ni par recyclage, ni par valorisation énergétique. A ce titre, ils sont réglementairement les seuls à pouvoir être stockés (Enfouis) dans un centre de stockage des déchets ultimes(CSDU) [4].

I.2.2 Par leur origine

a) Les déchets industriels

Les déchets des entreprises industriels, commerciales et artisanales sont les déchets dont l'élimination incombe à l'entreprise. Ils comprennent des matériaux de natures

Chap. I : Recherche Bibliographique

diverses (déchets de fabrication, emballages vides, sous-produits de production, rebuts, produits, obsolètes, résidus de nettoyage solides ou liquides ...) [4]. Ces déchets représentent environ 160 millions de tonnes par an, ils sont constitués pour les deux tiers d'inertes (déblais et gravats).

Une autre grande partie est assimilable aux ordures ménagères et appelée déchets industriels banals (DIB) ou déchets banals d'entreprises (DBE), ou encore déchets industriels non dangereux (DIND) [6].

Ils sont issus des industries, des commerces qui ont les mêmes caractéristiques que les ordures ménagères. Ils regroupent principalement les plastiques, les papiers-cartons, les textiles, le bois non traité, les métaux, les verres et matières organiques. Ils sont souvent produits en mélange. Ils peuvent être éliminés avec les ordures ménagères ou dans des installations spécifiques, car les communes n'ont pas d'obligation de traiter les DIB [4].

Le reste (Environ 18 Mt) constitue les déchets industriels spéciaux (DIS) ou déchets industriels dangereux (DID) : il s'agit d'éléments polluants nécessitant des traitements spéciaux [6].

b) Les déchets agricoles

Les déchets naturels sont soit utilisés sur place, soit employés dans un usage extérieur à l'exploitation. Les autres déchets portent sur les emballages, les produits de traitement et les matériels [7].

Avec 400 millions de tonnes de déchets par an, le secteur de l'agriculture présente la particularité de produire en grande quantité des fermentescibles et d'en réutiliser une bonne partie lui-même (Epanchages des fumiers par exemple). Les éleveurs sont les plus gros producteurs avec une moyenne de 280 Mt/an [6].

c) Les déchets industriels inertes

Les déchets industriels inertes sont les résidus des activités extractives, des déblais et produits de démolition (terre, gravats, sables...). En général, ils sont constitués d'éléments minéraux stables ou inertes au sens de leur «éco-compatibilité» avec l'environnement. Cela signifie qu'en cas de stockage ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Ils ne présentent donc pas de risque de pollution de l'eau et des sols [4].

Chap. I : Recherche Bibliographique

d) Déchets hospitaliers (DH), Déchets d'activités de soins (DAS) et déchets infectieux

Ces déchets hospitaliers sont des déchets de natures variées, mais qui ont pour caractéristique commune d'être potentiellement contaminés (seringues, aiguilles et autres matériels à usage unique, compresses, cotons, matériels divers de soins, liquides et déchets d'autopsies, déchets anatomiques, etc.) ou toxiques (produits chimiques de désinfection, résidus de médicaments cytotoxiques ou cytostatiques, etc.). Ce sont donc des déchets dangereux qui relèvent de mesures spécifiques, tant la collecte que pour le traitement, l'objectif étant de les éliminer de façon efficace tout en assurant une sécurité sanitaire maximale, pour l'environnement bien sûr, mais aussi pour le personnel manipulateur. Les déchets des cabinets médicaux libéraux font l'objet de contraintes de traitement analogues [6].



Figure I. 1: Déchets hospitaliers[8].

e) Déchets d'activités de soins à risque infectieux (DASRI)

Sont classés comme des déchets dangereux. Leur production est de l'ordre de 150 000 t/an. Le décret du 6 novembre 1997 (19) impose l'obligation d'élimination de ce type de déchets au producteur. Une convention écrite lie le producteur et le prestataire en charge de l'élimination du déchet. Des documents sont établis afin d'assurer la traçabilité des opérations de collecte et de traitement [7].

f) Les déchets radioactifs

Les déchets radioactifs des centres de radiothérapie et de médecine nucléaire rejoignent les circuits spécifiques de décontamination, le risque radioactif primant sur le

Chap. I : Recherche Bibliographique

risque infectieux. Ces déchets sont des solides ou liquides provenant de l'activité d'analyse radioactive, produits physiologiques résultant d'activités thérapeutiques ou d'exploration in vivo.

L'élimination de ces déchets est planifiée dans les plans d'élimination régionaux. Le stockage, le transport et l'élimination sont sévèrement réglementés. Le seul mode de traitement possible est l'incinération. Si le risque contaminant est majeur (Agents transmissibles non conventionnels), le recours à un centre spécialisé est obligatoire [6].

g) Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

Ce sont tous les déchets issus des ménages, des activités industrielles, commerciales, artisanales, et autres, qui sont assimilables aux déchets ménagers par leur nature et leur composition, tel que, déchets de cuisine, emballages,...etc. [5]. Cette catégorie recouvre : les ordures ménagères (OM) (fermentescible ou putrescible), les déchets organiques biodégradables, ou bio-déchets (déchets de cuisine, fleurs, etc ...), récupérés lors de collectes sélectives visant à les isoler des autres composés non putrescibles. Les déchets verts des jardins des particuliers sont souvent collectés avec cette fraction. Les déchets de marchés constituent également cette catégorie [9], les déchets municipaux (DM) ou urbains, les résidus urbains (Déchets du nettoyage), les déchets occasionnels (déchets encombrants et autres....) [7].

Les déchets encombrants : ce sont tous les déchets issus des ménages qui ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés en raison de leur caractère volumineux. Nous pouvons citer ici, les meubles, les pneus, l'électroménager, et le polystyrène expansé d'emballage [5].

I.3 Composition physique des DMA

Il existe plusieurs méthodes et études pour déterminer la composition physique des déchets qui sont basées sur l'échantillonnage et le tri manuel des déchets pour une zone ou un secteur donné. Parmi eux, on trouve la méthode de caractérisation des ordures ménagères, qui est la plus utilisée au niveau nationale en proposant 10 catégories de constituants : fractions putrescibles, papiers, cartons, textiles et textiles sanitaires, plastiques, verres, métaux, combustibles non classés (CNC), incombustibles non classés(INC), déchets spéciaux(dangereux) et élément fines.

Chap. I : Recherche Bibliographique

I.3.1 Déchets putrescibles

Les déchets putrescibles sont des déchets fermentescibles qui ont la particularité de se dégrader spontanément sans qu'il soit nécessaire de provoquer cette décomposition. Cette capacité intrinsèque de se décomposer rapidement fait appel à l'action de micro-organismes. Les déchets putrescibles sont composés notamment des résidus alimentaires issus des préparations en cuisine et des restes de repas. Tous les déchets fermentescibles ne sont pas nécessairement putrescibles [10].



Figure I. 2: Déchets putrescibles.

I.3.2 Papier et carton

Les déchets de papier et carton sont issus des journaux, tétra-briks de boissons diverses, emballage en carton de marché en gros et demi gros et de la fourniture scolaire et administrative (cahier, papier, etc ...). En Algérie, la capacité de recyclage de l'industrie papetière algérienne ne dépasse pas 10% de l'ensemble des déchets générés annuellement, alors que la consommation nationale de papier et carton est estimée à 600 000 tonnes/an [5].

I.3.3 Les déchets textiles

Les déchets textiles sont récupérés pour utilisation dans la fabrication de papier à lettre de qualité et de papier pour tapissage. En général, la séparation des autres résidus n'est guère pratique à cause de la présence de contaminants de tous ordres et de la difficulté de distinguer entre les fibres naturelles et synthétiques. Ces dernières ne peuvent être utilisées dans l'industrie du papier. La récupération de déchets textiles a donc un faible potentiel économique [11].

Chap. I : Recherche Bibliographique

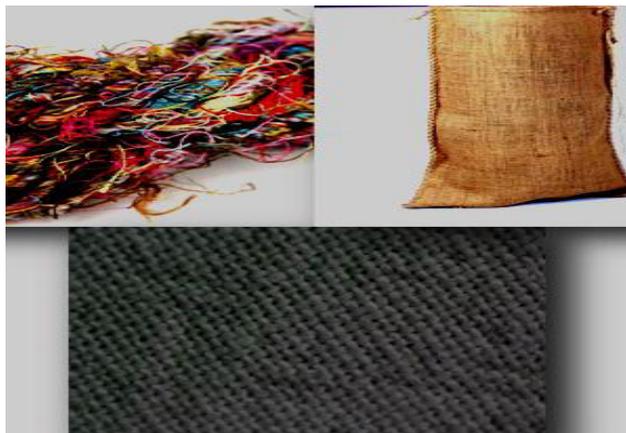


Figure I. 3: Déchets textiles.

I.3.4 Verre

Recycler le verre, qu'il soit brun, vert ou clair, permet une économie énergétique. En recyclant une seule bouteille, vous contribuez à l'économie d'assez d'énergie pour allumer une ampoule de 100 watts durant 4 heures. De plus, il faut 50% moins d'eau, la pollution de l'air est réduite de 20% et les résidus miniers de 80% [12].

I.3.5 Métaux

Le recyclage des métaux permet de préserver l'environnement sous plusieurs facettes, en tête de liste venant l'exploitation d'une mine, une activité très destructrice et polluante. On évite ainsi les opérations d'extraction, de raffinage et de transport, activités consommant beaucoup d'énergie et d'eau et produisant une quantité importante de gaz à effet de serre [12].

I.3.6 Plastiques

Les matières plastiques sont des polymères issus de la pétrochimie. La polymérisation existe dans la nature et est même extrêmement courante puisque le principal polymère naturel est la cellulose, présente dans tous les végétaux. D'autres matières naturelles sont aussi des polymères : la résine, la laine, la soie, les cheveux, etc. La grande majorité de ces produits sont transformables, modelables et donc dits « plastiques ».

Par analogie de propriétés et de structure, le terme matières plastiques regroupe un ensemble de produits issus de la pétrochimie (distillation puis « craquage » des essences légères), caractérisés par leur structure de polymères, leur légèreté, leur imperméabilité et leur grande résistance [13].

Chap. I : Recherche Bibliographique

Les déchets plastiques proviennent des résidus de processus de production, de transformation et de consommation. Il existe donc plusieurs types de déchets plastiques [14] :

a) Déchets plastiques industriels

Déchets de production et de transformation ces déchets sont constitués de l'ensemble des déchets issus des processus de production des résines (essentiellement trouvés dans les sites pétrochimiques) et de transformation des résines en objets. Les déchets de production proviennent des arrêts de réacteur de polymérisation, des purges de réacteurs et des lots déclassés.

Ils présentent la particularité d'avoir un degré de pollution faible, voire inexistant. On y retrouve, en très grande majorité, les polymères de grande diffusion (PE, PP, PS et PVC). Quant aux déchets de transformation, elles proviennent de toutes les opérations de plasturgie permettant l'obtention de produits finis (extrusion, injection, soufflage, calandrage, . . .). Ces déchets qui peuvent être homogènes comme fortement hétérogènes (mélanges provenant de la co-extrusion, co-injection, . . .) sont, en général, très peu souillés [14].

b) Les déchets plastiques de post-consommation

Pour les déchets agricoles on retrouve essentiellement les films, sacs, liens, fûts et bidons de produits phytosanitaires. La particularité de ce gisement réside dans ses fortes contamination (terre, cailloux) et pollution. Il s'agit pour l'essentiel de polyoléfines (PE-bd, PE-hd et PP).

c) Les déchets commerciaux ou de distribution

Il s'agit des emballages industriels et commerciaux qui sont en général de bonne qualité. Il y a également les fûts, bidons, sacs de grande contenance, conteneurs présents dans les secteurs de la chimie, l'agroalimentaire, le bâtiment et les travaux publics, pour le conditionnement et le transport de divers autres produits.

Enfin, on peut aussi citer le cas des emballages en polystyrène expansé utilisés dans différents domaines tel que : emballages des produits électroniques, médicales et pharmaceutiques, le calage lors du transport de produits fragiles, et dans une proportion moindre, pour les caisses à poisson et les plateaux horticoles.

Chap. I : Recherche Bibliographique

d) Les déchets électriques et électroniques

C'est un gisement issu de la filière de tous les produits électriques et électroniques tels que les ordinateurs, téléphones, appareils électroménagers et câbles en tout genre.

e) Les déchets ménagers

Qui sont essentiellement constitués par les emballages. Pour ce gisement, les matières principales concernées sont: le PET (Bouteilles de boissons gazeuses, eaux minérales, . . .), le PEHD (Bouteilles de lait, produits lessiviels, . . .), le PEBD (Sacs d'emballage) et le PVC (Bouteilles d'eau minérale, . . .)[15].

f) Les déchets du bâtiment et des travaux publics

Proviennent de l'huissierie, les tuyaux, revêtements de sols, profilés de fenêtre, conduits électriques, câbles, mousses d'isolation. Ces matériaux sont très fortement mélangés et leur degré de pollution est souvent élevé.

Les déchets de véhicules de transport sont représentés par l'ensemble des plastiques constituant les véhicules hors d'usage (VHU) (en moyenne 14% en masse du véhicule). Ces déchets constituent une fraction très hétérogène par rapport à la nature et l'âge. On y retrouve des polyoléfines, du PVC, des polycarbonates, ABS et des polyamides, des polyuréthanes, des résines thermodurcissables diverses, sans oublier les élastomères. Cette fraction ne cesse de croître du fait que les véhicules s'allègent de plus en plus et les équipements de sécurité sont en plein développement [14].

I.4 Évolution de la composition des DMA en Biskra 2014

Les caractérisations des DMA de l'année 2014, dans les trois zones de l'Algérie, est réparti en trois ensembles distincts ; le Sahara (zone aride), les hauts plateaux (zone semi-aride) et l'ensemble Tellien au nord (zone aride), dans cet étude nous sont comparé les résultats de la zone aride (Biskra) entre l'année 2010 et 2014 [16].

I.4.1 Zone aride

La production de déchets reçue sur le centre d'enfouissement technique (CET) d'El-Outaya, Biskra est évaluée à environ 90 t/j. Si on considère que cette quantité représente 80 % de la production totale, on peut estimer une production moyenne de déchets comprise entre 0,5 et 0,6 kg par habitant et par jour [17]. Le tableau I.1 représente les compositions globale des déchets entrants au CET du mois de Mai 2008 au Mars 2009. D'après le

Chap. I : Recherche Bibliographique

tableau I.1 et la figure I. 4 on peut observer que les déchets en plastiques sont classés les quatrièmes après les déchets putrescibles, papier et les déchets fines.

Tableau I. 1 : Composition globale des déchets entrants CET D’El Outaya [18]

Campagne Catégories	Mai 2008	Juil 2008	Nov 2008	Mars 2009
	1 ^{ère} Campagne %	2 ^{ème} Campagne %	3 ^{ème} Campagne %	4 ^{ème} Campagne %
Putrescibles	40	38,6	35,2	34,6
Papiers – Cartons	11,1	9,5	9,8	8,1
Textiles	9,9	11,4	13,8	19,3
Plastiques	14,7	13,3	9,9	11,9
CNC	2,7	0,8	1,9	2,5
Verres	1,0	1,9	2,0	1,1
Métaux	2,1	1,7	2,3	2,5
INC	0,9	0,7	0,4	0,8
Déchets Spéciaux	0,7	0,0	0,1	0,0
Fines	17	22,1	24,5	19,2

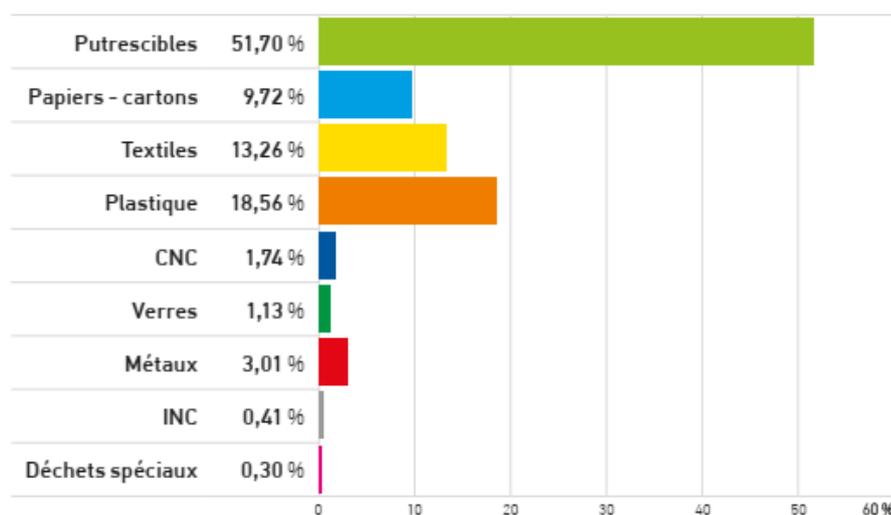


Figure I. 4: Composition moyenne annuelle des DMA à Biskra (zone aride) en 2014.

Les statistiques de 2014, représenté dans la figure I.5, montre une augmentation considérable de la quantité de déchets par rapport au 2008. Cette augmentation considère tous les types de déchets. L’utilisation de la matière plastique à vue une augmentation considérable d’où les déchets en plastique sont classés le deuxième en 2014 au lieu de quatrième en 2008.

Chap. I : Recherche Bibliographique

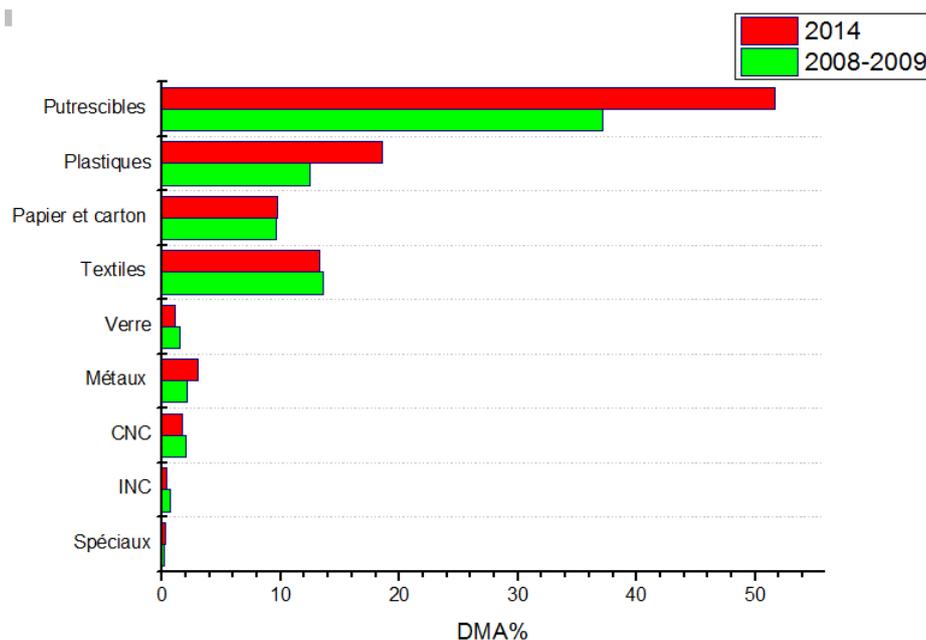


Figure I. 5: Quantité des compositions de DMA en 2008-2009 et 2014.

I.5 La gestion des déchets ménagers

Le cycle de vie des déchets urbains est souvent schématisé par la succession de cinq phases réparties dans le temps et dans l'espace : la production de déchets, le tri et la collecte, la valorisation par le recyclage, le traitement de la fraction non valorisable et l'élimination finale dans un site aménagé d'un résidu éco-compatible [19].

La réglementation algérienne (loi 01-19) définit la gestion des déchets comme «Toute opération relative à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, y compris le contrôle de ces opérations». À partir de cette définition, plusieurs opérations se distinguent dans le mode de gestion des déchets existant en Algérie [2].

I.5.1 La collecte des déchets

La collecte des déchets ménagers est « l'ensemble des opérations consistant à enlever les déchets pour les acheminer vers un lieu de tri, de traitement ou un centre d'enfouissement technique».

Cette étape comprend le ramassage des déchets, leur transport jusqu'au lieu de stockage provisoire dans un centre de transit ou jusqu'à leur lieu de traitement.

Cette activité peut être réalisée selon deux modes : la collecte indifférenciée et la collecte sélective. La collecte indifférenciée, également nommée collecte traditionnelle ou résiduelle, s'effectue sans distinction de nature des déchets. La collecte sélective, ou

Chap. I : Recherche Bibliographique

encore séparative, consiste à collecter une seule matière ou plusieurs dans des compartiments différents qui seront alors récupérés. Les collectes sélectives les plus répandues sont celles du verre, du papier et du plastique [20].

I.5.2 Le tri des déchets

Est la séparation des déchets selon leur nature en vue de leur traitement, par exemple le papier, plastique [5]. Cette opération implique chaque personne afin d'aider les entreprises et les acteurs de collecte de récupérer les déchets[2].

I.5.3 Le traitement

La nouvelle notion à appliquer dans la gestion des déchets est basée sur le principe connu sous l'appellation des 3R-VE(réduction à la source, réemploi, recyclage, valorisation et élimination) avec par ordre de priorité[2].

a) La Réduction à la source :

Le volume occupé par les déchets sera réduit pour libérer l'espace de stockage. La réduction de la quantité de déchets ou élimination des déchets se fait généralement à l'endroit même où ils sont générés ou stockés. D'une part, elle s'applique aux entreprises fabricantes pour réduire la masse des matières nécessaires et la conception de produits qui permettent de faciliter leur réutilisation, et d'autre part, elle s'adresse aux consommateurs pour les sensibiliser en suivant une consommation modérée et raisonnable [2].

b) Le Réemploi ou récupération

Le réemploi est la valorisation des déchets stockés. Les déchets à récupérer seront sortis de leurs circuits traditionnels de collecte et de traitement. Cette récupération est en amont de valorisation et suppose une collecte séparée [6].

c) Le Recyclage

Le recyclage implique souvent des opérations de tri, de sélection d'un certain type de déchets ensuite soumis à des procédés industriels permettant de réutiliser les matériaux qui les composent. Ce système permet de les réintroduire dans le cycle de production en remplacement d'une matière première neuve [20].

Chap. I : Recherche Bibliographique

d) La Valorisation

La réglementation algérienne (loi 01-19) définit la valorisation comme toutes les opérations de réutilisation, de recyclage ou de compostage des déchets. Elle consiste à une dégradation de la matière organique pour récupérer et valoriser l'énergie lors du traitement des déchets sous forme de chaleur, d'électricité ou de carburant[2].

e) L'élimination

L'élimination est la dernière étape dans la gestion des déchets. Elle comporte toutes les opérations de traitement thermique, physico-chimique et/ou biologique, de mise en décharge, d'enfouissement, d'immersion et de stockage des déchets, ainsi que toutes autres opérations ne débouchant pas sur une possibilité de valorisation ou autre utilisation du déchet [2].

- Immersion des déchets : tout rejet de déchets dans le milieu aquatique.
- Enfouissement des déchets : tout stockage des déchets en sous-sol.
- L'incinération est un processus d'oxydation de la partie combustible du déchet dans une unité adaptée aux caractéristiques variables des déchets. Ce processus permet une forte réduction de volume des déchets à éliminer (déchets concernés : hydrocarbures, huiles, peintures, déchets d'usinage...). Les déchets issus de l'incinération (cendres, mâchefer) sont ensuite éliminés en centre d'enfouissement technique(CET)[5].

I.6 Recyclage des matières plastiques

Le recyclage du plastique est considéré comme l'une des meilleures voies de prise en compte du développement durable. Il est devenu, une priorité en termes de gestion du développement durable [14]. Les méthodes de recyclage des matériaux polymères sont essentiellement divisées en quatre grandes catégories : la ré-extrusion (recyclage primaire), le recyclage mécanique (secondaire), le recyclage chimique (tertiaire) et l'incinération (quaternaire) [21].

I.6.1 Recyclage primaire ou ré-extrusion

Le recyclage primaire, mieux connu sous le nom de ré-extrusion, est la réintroduction de rebuts, de chutes en plastique industriels ou mono-polymères et pièces au

Chap. I : Recherche Bibliographique

cycle d'extrusion afin de produire des produits du matériau similaire. Ce processus utilise des déchets de plastique qui ont caractéristiques similaires aux produits originaux [22].

I.6.2 Recyclage secondaire ou mécanique

Le recyclage mécanique consiste à transformer des déchets par plusieurs étapes. Les déchets en matières plastiques sont lavés, broyés et refondus pour devenir des granulés ou des produits finis. Généralement, le recyclage mécanique ne fait pas des modifications dans la structure chimique des plastiques [23].

I.6.3 Recyclage tertiaire ou chimique

Le recyclage chimique consiste à traiter les déchets par une technique de décomposition [23]. Les étapes de recyclage chimique suivent les étapes suivantes:

a) La pyrolyse

C'est la décomposition des molécules par chauffage sous vide. Ce procédé conduit à des hydrocarbures liquides ou gazeux utilisables ultérieurement dans les raffineries.

b) L'hydrogénation

C'est le traitement par l'hydrogène et la chaleur des macromolécules qui sont craquées en huiles hydrocarbonées utilisables dans les raffineries et les usines de produits chimiques.

c) La gazéification

Les plastiques sont chauffés en présence d'air ou d'oxygène. Le gaz de synthèse résultant est constitué de monoxyde de carbone et d'hydrogène qui peut être utilisé dans la production de méthanol, d'ammoniac ou comme agent réducteur dans la production d'acier [24].

I.6.4 Recyclage quaternaire ou incinération

Ce type de recyclage constitue une méthode de récupération par incinération de l'énergie chimique stockée dans les déchets plastiques sous forme d'énergie thermique. Il est considéré comme indésirable, car il provoque la pollution de l'air ainsi que des risques sanitaires à cause des gaz toxiques produits [21].

Chap. I : Recherche Bibliographique

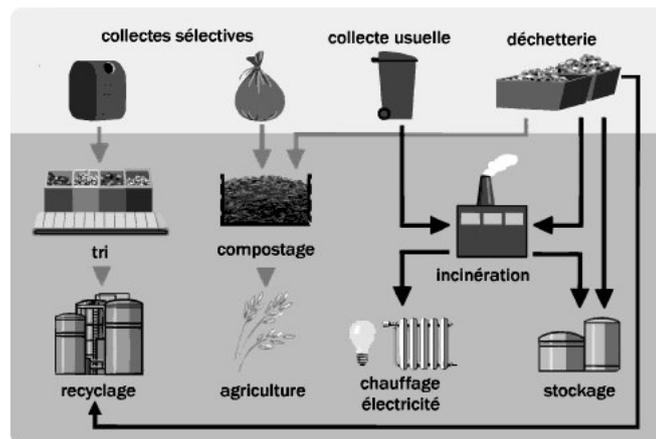


Figure I. 6: Gestion et recyclage des déchets.

I.7 Les contraintes du recyclage

a) Contraintes liées à la présence de différents grades de polymères et de composés toxiques

Un polymère peut se décliner suivant différents grades (masse molaire, viscosité, composition, ignifugeants et additifs...). Les différents grades d'un même polymère ne sont pas forcément miscibles entre eux. Or, lors du recyclage, il est impossible de les distinguer et de les séparer.

b) Contraintes liées à la présence d'impuretés

La nature chimique de l'impureté est également un paramètre important car suivant la miscibilité du polymère avec l'impureté, les propriétés en mélange n'évoluent pas de la même manière. La plupart des études réalisées sur des mélanges de polymères ont montrés que l'influence de la nature et de la quantité d'impuretés introduite dans un polymère sur ces propriétés mécaniques, thermiques et morphologique est donc primordiale afin d'estimer l'efficacité du recyclage mécanique d'un polymère.

c) Contraintes liées à la dégradation des polymères à recycler

Le polymère subit des dégradations chimiques et physiques d'une part durant son cycle de vie et d'autre part durant sa retransformations.

I.8 Solutions aux problèmes de l'utilisation des polymères recyclés

Afin d'améliorer les propriétés mécaniques d'un polymère recyclé, trois stratégies sont généralement appliquées :

Chap. I : Recherche Bibliographique

- Ajouter une quantité appropriée d'un matériau vierge au polymère recyclé (pureté élevée 99%) dans l'optique d'obtenir un matériau possédant les mêmes propriétés mécaniques et rhéologiques que la vierge équivalente.

- Ajouter des additifs tels que des modificateurs d'impact ou des élastomères, des comptabilisant, des fibres de verre, du carbonate de calcium en vue d'améliorer les propriétés mécaniques.

- Mélanger deux polymères recyclés pour combiner leurs propriétés mécaniques [25].

I.9 Avantages et inconvénients du recyclage

Dans un monde de plus en plus enclin au changement climatique, à la pollution et à la destruction de l'environnement, il est tout naturel de rechercher des solutions adaptées pour protéger l'environnement. Le recyclage des déchets plastiques s'impose comme l'une des solutions les plus efficaces pour lutter contre la pollution de l'environnement. En effet, les déchets plastiques ont de grands impacts sur la santé des populations, sur les espèces animales et sur la biodiversité en général. À titre illustratif, selon les scientifiques, un déchet plastique enfoui dans le sol prend environ 100 ans pour se dégrader, ce qui se révèle très nuisible pour l'environnement. Ces plastiques enfouis dans le sol finissent par porter atteinte aux cultures, car les empêchant d'étendre leurs racines sous la terre pour trouver les minéraux nécessaires à leur développement.

I.9.1 Les avantages du recyclage

Parmi les avantages de recyclage des déchets, on trouve [26] :

- La diminution de la pollution et des risques écologiques, car 1 tonne de plastique recyclé équivaut à 800 kg de pétrole brut économisé.

- La protection de l'environnement, car moins de déchets plastiques seront jetés

- La protection des espèces animales en général et des espèces aquatiques en particulier.

- La préservation des ressources, parce que moins de matières premières seront utilisées et la préservation de la couche d'ozone, car moins de matières nuisibles seront brûlées.

Chap. I : Recherche Bibliographique

- Valorisation des déchets pour la production des nouveaux matériaux.
- Libérer les espaces de stockage occupé par les déchets.

I.9.2 Les inconvénients du recyclage

Bien qu'avantageux sur plusieurs plans, le recyclage présente aussi quelques inconvénients :

- Le tri sélectif est indispensable au recyclage. Les déchets doivent être classés en fonction du mode de recyclage qui leur est adapté. Pour que le tri soit le plus correct possible, un investissement dans la sensibilisation des collaborateurs est nécessaire.

- Le recyclage présente un coût supplémentaire pour l'entreprise. C'est plus onéreux que les autres modes de traitement des déchets.

- Certaines matières premières, comme le papier et le plastique, sont altérés au travers du processus de recyclage. Même s'ils peuvent être réutilisés, ils ne conservent plus leur qualité d'origine (Propriétés mécanique par exemple).

- Les entreprises qui se sont investies dans la gestion durable des déchets, particulièrement dans le recyclage, sont encore peu nombreuses et mal réparties. La collecte et le transport des déchets pourraient alors induire à plus de pollution [27]. Les différents procédés de transformation du plastique

I.10 Les différents procédés de transformation du plastique

I.10.1 Calandrage

Ce procédé permet de fabriquer en continu une feuille à partir de caoutchouc ou de PVC. Il consiste à mélanger entre des cylindres chauffés la résine et des additifs. Le cisaillement de la matière provoque à la fois le mélange et l'échauffement. La matière forcée entre des rouleaux est étirée à l'épaisseur voulue, refroidie sur les cylindres terminaux et enroulée pour expédition [28].

Le calandrage a pour objectif de mettre le mélange en feuilles minces (3 mm maximum) et de recouvrir de caoutchouc un textile ou des fils métalliques. Ces composites calandrés sont largement utilisés dans la fabrication de pneumatiques (carcasses), rouleaux transporteurs, draps d'hôpitaux, vêtements de pluie... Pour réaliser de faibles épaisseurs

Chap. I : Recherche Bibliographique

(quelques dixièmes de millimètre), on utilise une technique voisine, l'enduction, qui consiste à déposer le caoutchouc sous forme liquide sur un support généralement textile [29]. Cette technique est généralement employée pour produire des feuilles et des films de thermoplastiques tels que PVC rigide et souple, EVA, polypropylène, ABS...

- Plastifier ou fondre le thermoplastique par passage dans une extrudeuse ou un mélangeur.

- Laminer le thermoplastique plastifié ou fondu entre des cylindres tournant en sens inverses pour obtenir un film ou une feuille d'épaisseur constante.

- Les épaisseurs sont dans une gamme de 80-800 μm avant étirage et 25 μm et plus après étirage.

- Refroidir le polymère pour lui redonner sa consistance d'origine.

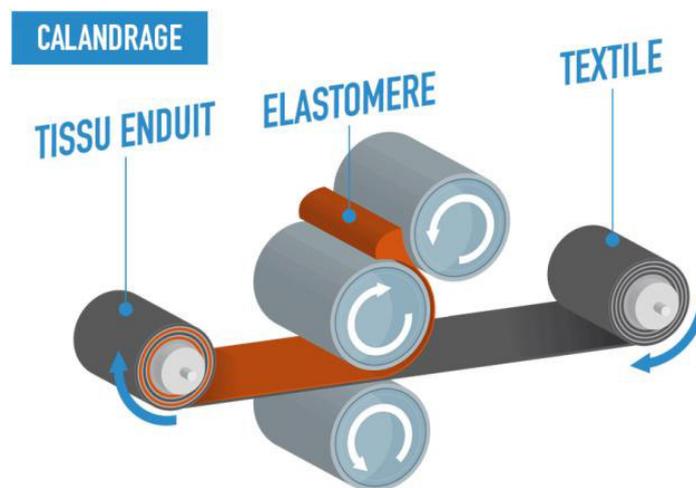


Figure I. 7: Principe de Calandrage.

Pour le recyclage des déchets avec le procédé de calandrage (Figure I.7 et I.8), des machines très spécifiques, dites calandres, nécessitant des investissements lourds qui sont utilisées pour des produits à fort rendement, sa largeurs sont dans une gamme de 0,8 à 3 m ou plus de longueur de table (longueur des cylindres), 2 à 7 cylindres et 400 à 900 mm de diamètre de cylindre [30].

Chap. I : Recherche Bibliographique

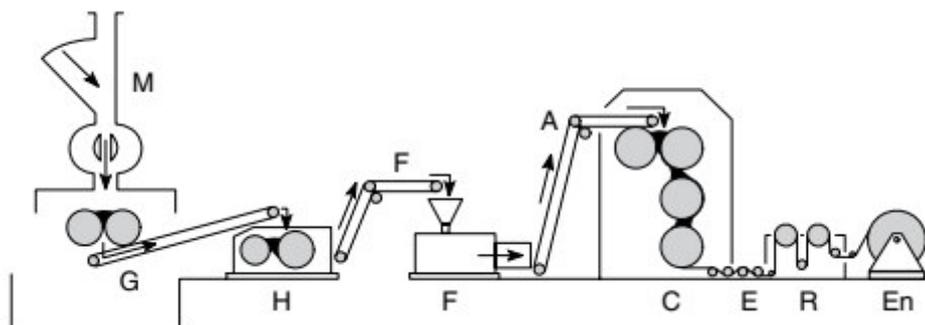


Figure I. 8: Schématisation d'une chaîne de calandrage [28]

I.10.2 Thermoformage

Le thermoformage consiste à plaquer une feuille de thermoplastique ramollie par chaleur sur les parois d'un moule pour lui en faire prendre la forme. Le formage peut être réalisé par l'action directe du moule sur la feuille de thermoplastique (emboutissage) ou plus souvent par action combinée avec une aspiration ou une pression facilitant la mise en forme. Après refroidissement partiel ou total, on procède au démoulage et découpage des bords.

La figure I.9 présente la mise en forme d'une feuille ramollie par dispositif de chauffage, infrarouge par exemple, à l'aide d'un moule male faisant office de poinçon.



Figure I. 9: Procédé de thermoformage.

Le thermoformage permet de fabriquer, à partir de feuille destinées à cet usage, des pièces de dimensions finies qui peuvent être importantes. La forme générale de la pièce

Chap. I : Recherche Bibliographique

doit obéir à certains critères tels qu'éviter les formes trop compliquées et assurer le démoulage. Certaines forme tel que les bossages, nervures pleines, inserts, rayons de courbure trop faibles, trous et évidements, emboutis trop profonds, ne sont pas réalisables.

Les pièces fabriquées par le thermoformage ne sont pas isotropes à partir du moment où les angles et les profondeurs d'emboutissages atteignent des valeurs non négligeables. Le procédé convient du prototype à la grande série à condition d'utiliser le matériel adapté. Les moles sont peu couteux mais les feuilles sont chères et les chutes de détournage importantes.

Le choix des matières est limité et des feuilles de grades spéciaux sont nécessaires. Parmi les thermoplastiques de grade diffusion, citons les PS, ABS, PVC, PE et PP. L'offre en thermo-formeuses est très diversifiée, allant des machines manuelles très simples et peu onéreuses jusqu'aux machines très spécifiques produisant un seul type d'article en passant par tout un éventail de modèles standards, mono-station ou multi-stations, traitant des films ou des feuilles de 0.1 à 8 mm en rouleaux ou en feuilles [30].

I.10.3 Extrusion

La principale fonction de l'extrudeuse est de convoyer le polymère, de le fondre et de le mettre en pression, pour qu'il puisse franchir la filière placée à son extrémité Figure.I.10-a L'état du polymère dans la machine permet de distinguer trois zones [31]:

- **La zone de convoyage solide** : dans laquelle le polymère est entièrement solide
- **La zone de fusion** : dans laquelle coexistent le polymère encore solide et le polymère déjà fondu.
- **La zone de pompage** : dans laquelle le polymère est totalement fondu.

Il existe deux types extrudeuse bi-vis, étant la plus utilisée industriellement (Figure.I.10-a) [24], et mono-vis (Figure.I.10-b) avec :

A : L'ensemble vis-fourreau avec ses accessoires de chauffage et de refroidissement.

B et C : Le moteur principal.

D : Des dispositifs pour l'alimentation en matière (doseurs).

E : Un dispositif de coupe ou de mise en forme de la matière extrudée (filière).

Chap. I : Recherche Bibliographique

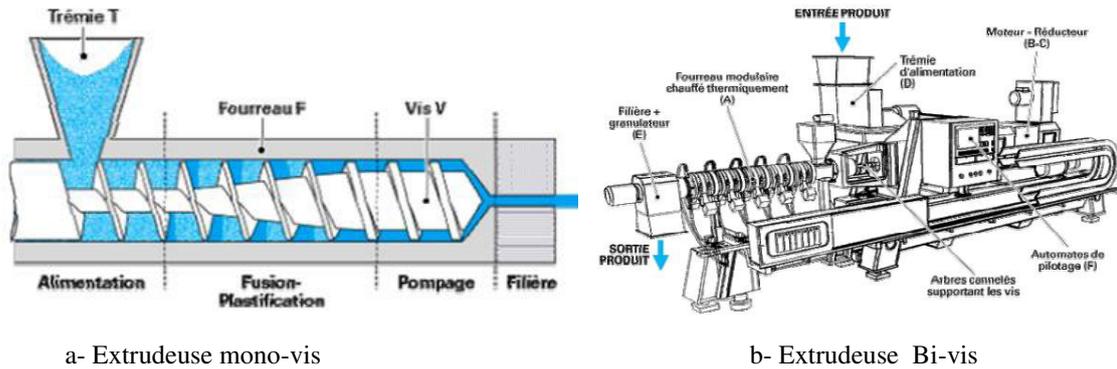


Figure I. 10: Type d'extrudeuse [31].

a) Extrusion gonflage

C'est une variante de l'extrusion qui permet de fabriquer des films plastiques. Ce procédé consiste en sortie de l'extrudeuse à dilater avec de l'air comprimé une gaine en polymère précédemment formée.

La sortie de l'extrudeuse est verticale, on insuffle de l'air comprimé dans la matière fondue qui se gonfle et s'élève verticalement en une longue bulle de film. Après refroidissement des rouleaux aplatissent le film en une gaine plane qui s'enroule sur des bobines. On fabrique ainsi des films utilisés dans la fabrication d'emballages, de sacs poubelles....[32].

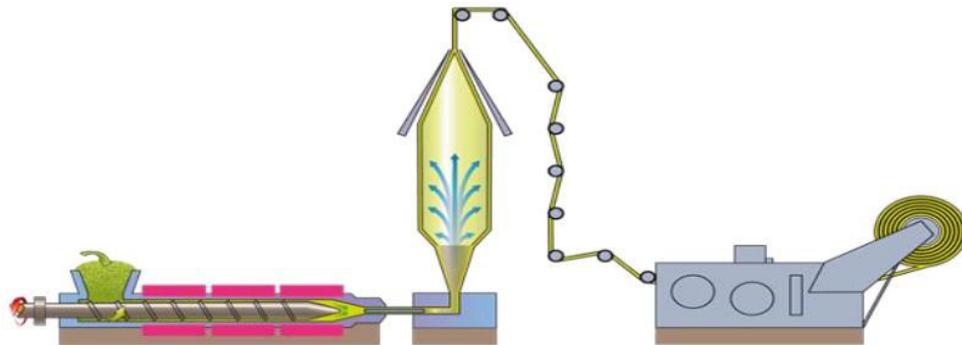


Figure I. 11: Principe d'extrusion gonflage.

b) Extrusion Soufflage

Une paraison (matière plastique creuse) obtenue par l'extrusion ou le moulage par injection est serré dans un moule, et gonflé avec de l'air pour avoir des bouteilles pour toutes sortes d'utilisations. Les bouteilles en PET sont fabriquées par étirage moulage afin de les rendre moins susceptibles de se rompre [22].

Chap. I : Recherche Bibliographique

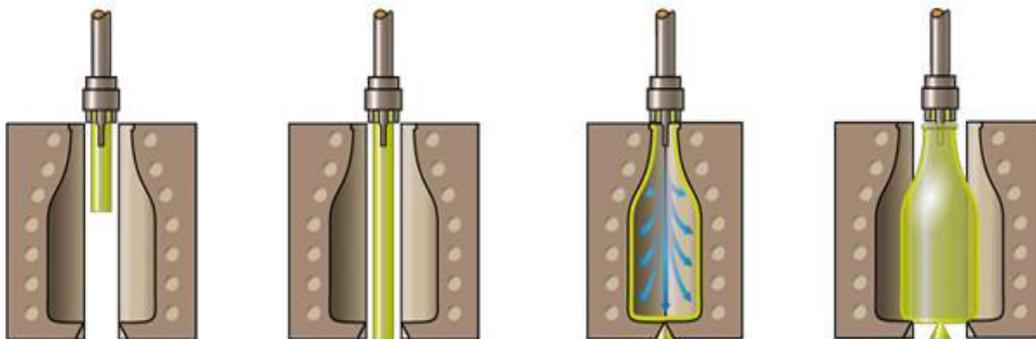


Figure I. 12: Principe d'extrusion soufflage.

c) Moulage par Injection

Le moulage par injection est appliqué aux matrices thermoplastiques, mais les deux types de matrices (thermodurcissables et thermoplastiques) peuvent subir le moulage par coulée, à condition qu'elles soient suffisamment fluides pour être versées dans le moule. Ce procédé permet d'obtenir des temps de cycles plus courts qu'en compression ; cela nécessite aussi des systèmes catalytiques plus réactifs.

Pendant, le procédé d'injection est un peu plus difficile avec une matrice thermodurcissable qu'avec une matrice thermoplastique car une polymérisation doit intervenir lors de la phase de moulage et une post-réticulation peut être nécessaire pour garantir une bonne stabilité chimique et thermique. Ce procédé en différentes étapes reste encore trop coûteux pour une industrialisation [33].

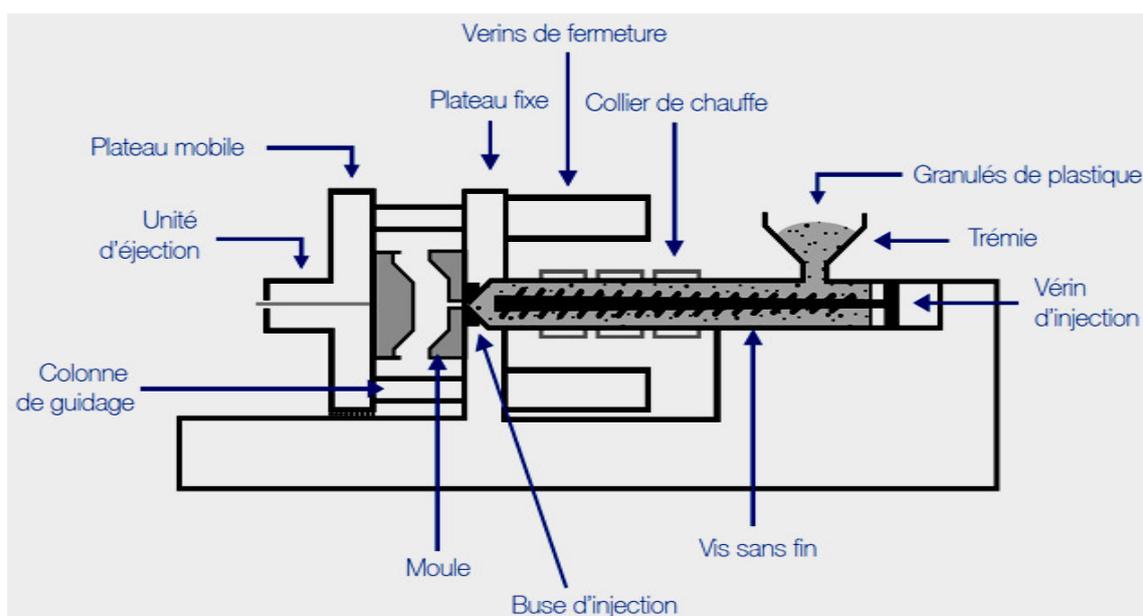


Figure I. 13: Principe de moulage par injection.

Chap. I : Recherche Bibliographique

I.10.4 Recyclage par fusion de la matière

Les thermoplastiques doivent être chauffés pour fondre la matrice afin de souder les plis entre eux, de consolider et de former le composite. Pour des raisons économiques, techniques offrant de grandes vitesses de chauffage sont préférées. Les moules ou les plateaux de presse chauffés électriquement ou à l'aide d'huile sont fréquents. Souvent on utilise une étape de préchauffage afin de diminuer encore les temps de cycle lors du formage.

Les principales techniques de préchauffage sont les fours à air chaud, le chauffage par conduction obtenu par le passage du matériau entre des plaques chauffantes ou entre des cylindres chauffés, par radiation infrarouge (IR), par résistance électrique en utilisant la conductivité des fibres de carbones ou de mèches métalliques. Le chauffage par induction d'éléments magnétiques intégrés dans les moules est également en voie de développement. Pour les procédés en continu comme la pultrusion ou la dépose de rubans, les pré-imprégnés sont en mouvement et des systèmes de chauffage très rapide sont utilisés (IR, laser, torches de gaz chauds). Le contrôle de la température est très important notamment pour éviter la dégradation du matériau.

Pour modéliser transferts de chaleur, il faut tenir compte notamment de l'anisotropie de la conductivité thermique, de sa variation avec la fraction volumique de fibres et de la chaleur latente de fusion des matériaux semi-cristallins.

Les méthodes de mise en œuvre sont tributaires des comportements rhéologiques des matrices de polymères fondus. La réponse du composite fondu aux sollicitations externes est très complexe et dépend du temps. Que ce soit au-delà du plateau caoutchoutique pour les matrices amorphes ou de la fusion pour les semi-cristallins, le comportement est viscoélastique [34].

I.10.5 Le thermo-pressage

Le thermo-pressage est également appelé moulage par compression. Cette technologie est issue de l'industrie des composites à base de résines thermodurcissables. Son principe de fonctionnement est décrit par la Figure 1.23. Le mélange est chargé dans le moule chauffé par conduction. Les plateaux de la presse se rapprochent et viennent comprimer la matière qui ramollit et prend la forme de l'empreinte. Le moule est maintenu fermé sous pression pendant le temps de la réaction de réticulation du thermodurcissable. Lorsque celle-ci est terminée, les plateaux s'écartent l'un de l'autre et la pièce est dégagée.

Chap. I : Recherche Bibliographique

Le thermo-pressage est la technologie décrite comme la plus facile à mettre en œuvre avec les bio-polymères comme les protéines dont le comportement se rapproche de celui des thermodurcissables, mais aussi comme l'amidon ou les composites fibres lignocellulosiques/ protéines comme le tourteau de tournesol.

Cependant, la présence d'eau dans les bio-polymères impose plusieurs contraintes lors du moulage par compression. En effet, quand la matière est chauffée au-delà de 100°C, l'eau passe sous forme vapeur et tend à s'échapper. Si cette vapeur d'eau n'est pas évacuée au début du cycle, par exemple par une entrouverture du moule, des cloques risquent de se former à la détente du moule à chaud, quand la pièce n'explose pas. Pour diminuer la pression de vapeur, le moule peut être refroidi avant son ouverture, mais ceci ralentit considérablement les cadences de fabrication. Pour résoudre ce problème, un système de carrousel a été développé afin de presser une première fois la matière à chaud pour lui donner sa forme, puis un seconde pressage, à froid, remet en forme l'objet en profitant de la chaleur accumulée lors du premier pressage [35].

a) Le Pressage à chaud

Quatre facteurs principaux justifient l'importance du pressage dans le procédé de fabrication des panneaux. Il s'agit de :

- La forte consommation d'énergie
- La variation de la qualité du produit final par tous les mécanismes de transfert de chaleur et de masse qui se produisent dans la matrice.
- le temps de pressage affecte la productivité
- le profil de densité, développée durant cette étape.

Pendant la compression à haute température, de nombreux processus physiques et chimiques sont mis en œuvre dans le mat et se produisent de façon simultanée. Leur étude doit prendre en compte tous les phénomènes physiques locaux tels que le transfert de masse et de chaleur, en utilisant les stratégies de contrôle de la presse et les simulations par ordinateur. La Figure, décrit trois étapes principales dans le cycle de pressage.

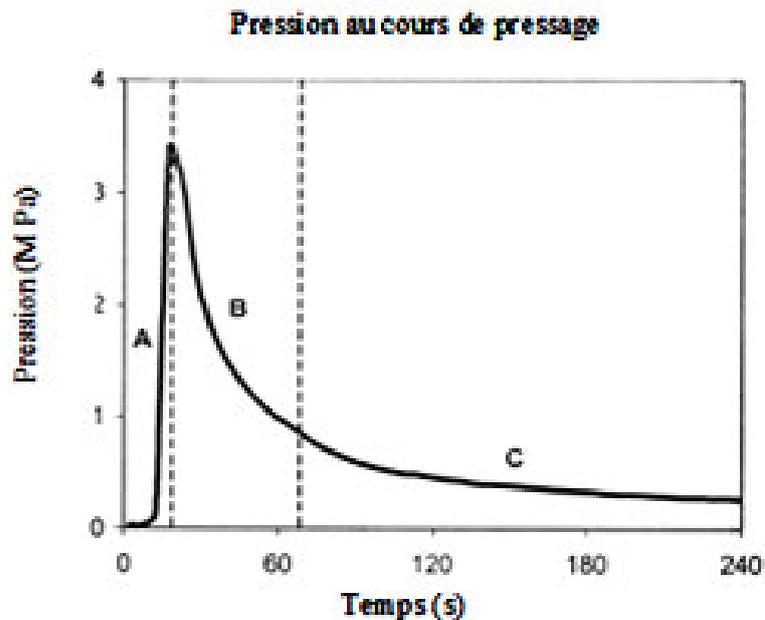


Figure I. 14: Cycles de pressage.

- **La consolidation**

Le plateau supérieur de la presse entre en contact avec la surface supérieure de l'échantillon et l'élimination des espaces vides commence jusqu'à ce que l'épaisseur finale soit atteinte, en même temps que la pression évolue dans le temps. Cette étape est équivalente à la fermeture de la presse désignée par TFP (Temps de fermeture de la presse).

- **La relaxation transitive**

La relaxation commence après avoir obtenu le maximum de pression sur l'ébauche. La diminution de la pression durant cette étape est graduelle et donne du temps pour la polymérisation du liant.

- **La relaxation asymptotique**

Pendant cette étape la pression est un peu plus constante, mais le plateau supérieur est encore en contact avec l'ébauche.

Finalement, la décompression ou dégazage se produit quand le plateau supérieur se dégage de l'ébauche. L'ouverture des plateaux est totale et le cycle de pressage se termine [36].

Chap. I : Recherche Bibliographique

I.11 Généralité sur les matériaux composites

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles, mais ayant une forte capacité d'adhésion. Le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas [36]. En combinant deux phases différentes, par exemple dans cette étude le matériau composite étudié est obtenu à partir des déchets naturels de palmier dattier, utilisé comme renfort, et des déchets industriels en polystyrène expansé recyclé, utilisé comme matrice [37].

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

- ✓ Les composites à matrices organiques (CMO), qui constituent aujourd'hui la très grande majorité des composites industriels.
- ✓ Les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines spatial, nucléaire et militaire, ainsi que le freinage (freins carbone).
- ✓ Les composites à matrices métalliques (CMM) intéressent les concepteurs des industries automobiles, électroniques et de loisirs pour répondre à des exigences mécaniques spécifiques.

I.11.1 La matrice polymérique

La matrice permet de lier les fibres du renfort entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). Elle est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres. Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymérique [38].

Le plastique est une matière synthétique composée de polymères, qui a la propriété d'être moulée ou modelée facilement après chauffage et qui peut être souple ou rigide. On appelle polymère [14]. Il existe plusieurs formes de classes de polymères suivant leur origine (naturelle ou synthétique), leur propriété (chimique et physique) et leur aptitude à cristalliser [39]. Les polymères sont souvent classés en fonction de leurs propriétés thermomécaniques. On peut citer les classes suivantes à titre d'exemples [40] :

Chap. I : Recherche Bibliographique

a) Les thermodurcissables

Les thermodurcissables durcissent quand on les chauffe. Un exemple connu est celui des colles ou des peintures. Ils sont également très employés comme pièces de structures thermostables; par exemple les résines poly-époxydes, et certains polyesters. On les met en forme lorsqu'ils sont encore dans leur état mou, de la même manière que les thermoplastiques avant qu'ils ne durcissent sous l'effet de la chaleur et d'additifs chimiques qui induisent la réaction de polymérisation [41]. Le tableau I.2 montre quelques caractéristiques des polymères thermodurcissables les plus utilisés.

Tableau I. 2:Caractéristique des résines thermodurcissables [38]

Résine	ρ	$\sigma_{traction}$ (GPa)	MOE (GPa)	T_c (°C)
polyester	1,2	50-65	3	120
Phénol Formaldéhyde	1,2	40-50	3	120-150
Epoxyde	1,1-1,4	50-90	3	120-200
Polyuréthane	1,1-1,5	20-50	1	100-120
Vinyl-ester	1,15	70-80	3,5	14

b) Les thermoplastiques

Les thermoplastiques sont dérivés de monomères linéaires ou légèrement ramifiés qui forment le motif de base d'une chaîne où ils sont maintes fois répétés. Sous l'action de la chaleur, le thermoplastique se ramollit conduisant à l'apparition de mouvements à longue portée dans les chaînes moléculaires. Le thermoplastique peut alors être solidifié par refroidissement en prenant la forme souhaitée. Ce processus de ramollissement par excitation thermique et de durcissement par refroidissement peut être répété indéfiniment car, contrairement aux résines thermodurcissables, quasiment aucune modification chimique ne vient altérer les thermoplastiques. Il s'agit plutôt d'une modification de l'agencement intermoléculaire (le volume libre) [42], entre autres caractéristiques. Les thermoplastiques présentent une faible masse volumique, leur formulation est prête à l'emploi, le stockage en est illimité, et ils manifestent souvent une bonne tenue au choc et à l'impact. Quoique leurs performances soient satisfaisantes, la plupart du temps autour de l'ambiante, les propriétés des thermoplastiques purs chutent avec une hausse température d'utilisation [43]. Le tableau I.3 et tableau I.4 montre, respectivement, quelques caractéristiques physiques et mécaniques des polymères thermoplastiques les plus utilisés.

Chap. I : Recherche Bibliographique

Tableau I. 3: Caractéristiques physiques des polymères thermoplastiques [44].

Type de polymère	Masse vol. (Mg/m ³)	Temp. de trans. vitreuse (°C)	Temp. de fusion (°C)	Condu. therm. (W/m · K)	Permit. relative
Polyoléfines					
PEbd	0,92 à 0,95	- 110 à -100	115	0,35	2,25 à 2,35
PEhd	0,95 à 0,98	- 110 à -100	130	0,52	2,3 à 2,4
PP	0,90	- 30 à -10	170	0,2	2,2 à 2,6
Polyvinyliques					
PVC	1,4	75 à 105	160	0,15	2,7 à 3,3
Polystyréniques					
PS	1,1	90	-	0,1 à 0,15	2,4 à 3,1
ABS	1,03 à 1,08	110	-	0,14 à 0,22	2,4 à 2,9
Polyacryliques					
PMMA	1,2	120	225	0,2	2,6 à 3,2
Polymères fluorés					
PTFE	2,2	125	330	0,25	2,0 à 2,1
Polyoxyméthylènes					
POM	1,41	- 50	170	0,22 à 0,35	3,6 à 4
Polyamides					
PA6-6	1,14	70	250	0,2 à 0,25	3,3 à 3,6
Polyesters saturés					
PETP	1,32 à 1,38	70	255	0,15 à 0,34	3 à 3,6
Polycarbonates					
PC	1,24	150	230	0,18 à 0,22	2,9 à 3,1
Polysulfones					
PSU	1,24	190	-	0,19 à 0,27	3,1 à 3,2
Cellulosiques					
CA	1,26	120	-	0,17 à 0,32	5 à 5,5

Chap. I : Recherche Bibliographique

Tableau I. 4: Caractéristiques mécaniques des polymères thermoplastiques [41].

Coeff. de dilat. linéaire ($10^{-6}/K$)	Module de Young à 20 °C, 100s (GPa)	Résist. à la traction à 20 °C (MPa)	Allong. à la rupture à 20 °C (%)	Ténacité à 20 °C ($MPa \cdot m^{1/2}$)
Polyoléfines				
160 à 190	0,15 à 0,24	7 à 17	400 à 800	1 à 2
150 à 300	0,55 à 1	20 à 37	700 à 1 000	2 à 5
100 à 300	1,2 à 1,7	20 à 70	200 à 1 000	3,5
Polyvinyliques				
50 à 70	2,4 à 3	40 à 60	10 à 50	2,4
Polystyréniques				
70 à 100	3,0 à 3,3	35 à 68	4 à 5	2
70 à 95	1,8 à 2,7	30 à 60	20 à 60	3 à 4
Polyacryliques				
54 à 72	3,3	65 à 90	4 à 5	1,0 à 1,6
Polymères fluorés				
70 à 100	0,35 à 0,75	15 à 40	250 à 500	2,5 à 3
Polyoxyméthylènes				
75 à 200	3,5	70	65	2 à 4
Polyamides				
80 à 95	2 à 3,5	60 à 110	60	0,5
Polyesters saturés				
50 à 80	2,0 à 3,5	50 à 80	65 à 300	1,2 à 2
Polycarbonates				
60 à 75	2,3 à 2,8	55 à 75	90 à 130	2,6 à 3,2
Polysulfones				
56 à 58	2,4 à 2,7	65 à 100	25 à 80	1,4 à 1,9
Cellulosiques				
80 à 170	1 à 2,9	25 à 50	3 à 70	1,2 à 2

I.12 Le polystyrène (PS) et PS Expandé

La découverte du polystyrène (PS) remonte à 1839 mais son exploitation à grande échelle en Allemagne et aux États-Unis. Les premiers succès ont été obtenus en Europe en 1930, plus spécifiquement en Allemagne, par les usines d'IG-Farben industrie. Aux États-Unis, la première production à l'échelle industrielle a été réalisée en 1938 par Dow Chemical Company [45].

Le polystyrène est obtenu par la polymérisation de styrène qui est obtenu à l'action de benzène sur l'éthylène lorsqu'il est soumis à une décomposition thermique. Le polystyrène adoucit à une température d'environ 120°C, fond à moins de 160°C (car il est amorphe) et se volatilise entre 470 et 500°C . Il existe trois types de polystyrène :

Chap. I : Recherche Bibliographique

- Le polystyrène cristal ou dense.
- Le polystyrène choc ou haut impact.
- Le polystyrène expansé (PSE).

Le polystyrène expansé est obtenu par la polymérisation du styrène (C_8H_8) avec un adjuvant de gonflement (souvent avec le pentane (C_5H_{12})). L'expansion est obtenue par un procédé physique à vapeur. Dans le polystyrène expansé, il y a 95% à 98 % de gaz et seulement 5 ou 2 % de polystyrène. Ce produit est beaucoup employé pour l'isolation thermique dans le secteur de construction et le secteur d'emballage grâce à ces propriétés de conductivités thermiques ($\gamma \leq 0,04 \text{ W/m.K}$) et de sa densité ($20 \pm 5 \text{ kg/m}^3$) [39].

I.12.1 Sources du polystyrène post utilisation

Il existe trois sources de PS post utilisation [45] : le PS postindustriel, le PS post-commercial et le PS post-consommation.

a) Polystyrène postindustriel

Le PS postindustriel (standard, expansé ou choc) qui rejoignent les déchets des fabricants des divers produits à base de PS. Générées dès l'usine, elles ne se rendent pas dans le secteur commercial. Ces déchets peuvent être composés de chutes, de découpes à l'emporte-pièce, de rejets causés par l'inspection d'assurance qualité, etc.

b) Polystyrène post-commercial

Le PS post-commercial est défini comme étant le PS (standard, expansé ou choc) qui se retrouve dans déchets du secteur commercial et qui ne se rend pas jusqu'au consommateur. A titre d'exemple : produits d'emballage, enseignes de magasins, etc.

c) Le polystyrène post-consommation

Le PS post-consommation est défini comme étant les emballages, contenants et produits en PS (standard, expansé ou choc) achetés par le consommateur, utilisés puis jetés. Dans la perspective des collectes municipales, le PS post-consommation fait partie des contenants à courte durée de vie.

I.12.2 Recyclage du polystyrène expansé

Le recyclage et le réemploi permettent d'économiser une grande quantité d'énergie primaire, notamment du pétrole, et de réduire ainsi la pollution dans l'environnement. La

Chap. I : Recherche Bibliographique

faible densité apparente du polystyrène expansé rend sa collecte difficile. Le collecter et le transporter sur de longues distances (soit pour le recyclage, soit pour l'incinération, soit pour le stocker dans les décharges) est donc peu rentable. Le meilleur moyen de collecter les déchets de PSE est de réduire préalablement leur volume. Il existe deux possibilités pour réduire le volume du PSE : soit physiquement, par un thermo-compacteur, soit chimiquement, par un solvant organique [39].

Chapitre II

Matériaux et méthodes expérimentales

II Matériaux et méthodes expérimentales

Cette partie résume les différentes étapes de l'élaboration des matériaux. Deux types de matériaux sont élaborés, un matériau 100% de polystyrène et un matériau composite. Le premier matériau (100% polystyrène) est obtenu par le recyclage des déchets de polystyrène expansé et le deuxième matériau, un composite, est un mélange de déchets de polystyrène expansé recyclé avec un renfort naturel. Le renfort naturel est utilisé sous forme de fibres courtes de déchets de palmier dattier. Deux techniques de recyclage ont été utilisées dans l'élaboration des matériaux.

Une caractérisation expérimentale des matériaux obtenus est effectuée afin de déterminer les propriétés mécaniques de chaque type de matériau.

II.1 Procédés d'élaboration du Matériau

Pour la fusion des déchets de polystyrène expansé, deux bancs d'essais ont été utilisés pour le recyclage des déchets de polystyrène expansé. La première technique est basée sur la fusion de la matière (Recyclage et moulage par fusion), et la deuxième technique est basé sur la fusion de la matière sous pression (Thermo-pressage).

II.1.1 Recyclage et moulage par fusion

La fusion est une technique généralement utilisée dans la fusion de matrice des composites thermoplastiques [34]. Le banc d'essai (expérience) utilisé dans la première technique (Recyclage par fusion de la matière) est constitué de trois parties. Il est composé d'une résistance électrique, un moule et un support. La résistance électrique est utilisée pour assurer une température de fusion des déchets de polystyrène expansé. Le moule est utilisé pour obtenir des plaques rectangulaires en polystyrène avec une épaisseur définie. Le support est réalisé pour maintenir la résistance et le moule.

a) Le Moule et support

Pour la préparation des éprouvettes de traction selon les normes exigées, un moule de dimensions $190 \times 190 \times 15\text{mm}$ est fabriqué (Figure II.1-b). Le moule est maintenu à l'aide du support (Figure II.1-a) pour permettre d'appliquer deux résistances. Après la fusion de la matière dans le moule une plaque rectangulaire est obtenue après refroidissement.



Figure II. 1: Moule métallique démontable.

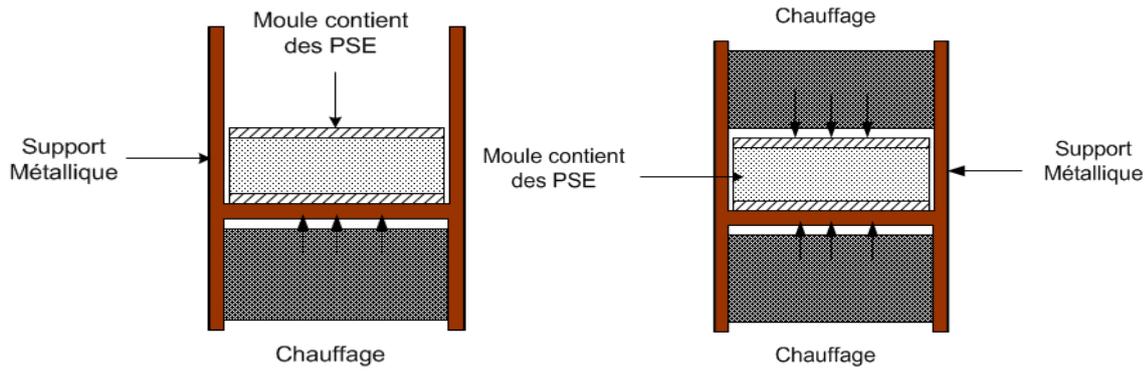
b) Résistances électrique

Pour assurer une température de fusion de la matière, une résistance électrique est utilisée, comme plaque chauffante. La plaque chauffante est composée d'une brique et un fil de résistance électrique (Figure II.2).



Figure II. 2: Résistance électrique.

Le schéma suivant (Figure II.3) donne une description sur le banc de l'expérience utilisé dans la technique du recyclage et moulage par fusion. La fusion de la matière est effectuée par deux configurations. Dans la première configuration une seule plaque chauffante est utilisée, au dessous du moule (Figure II.3-a), et la deuxième configuration utilise deux plaques chauffantes, une au dessous, et l'autre au dessus du moule (Figure II.3-b).



- Fusion par une plaque chauffante
- b- Fusion par deux plaques chauffantes

Figure II. 3: Recyclage et moulage de PSE par fusion.

c) Matériau obtenu par recyclage et moulage par fusion

Les déchets de polystyrène expansé sont fondus par les deux configurations, citées précédemment, avec deux temps de maintien, 20 et 30 minutes. Un préchauffage du moule jusqu'à une température de fusion du polystyrène expansé qui égale à 180°C. La pression appliquée sur le polystyrène expansé est seulement la pression du couvercle du moule. Le tableau I.1 résume les configurations étudiées.

Tableau II. 1: Configuration des matériaux élaborés par fusion.

Type de fusion	Configuration	Temps de fusion (min)
Fusion à une face	F-1-1	20
	F-1-2	30
Fusion à deux faces	F-2-1	20
	F-2-2	30

Après fusion des déchets de polystyrène expansé, et pour obtenir une plaque rigide, le moule est refroidi à l'eau. La plaque obtenue est 100% polystyrène expansé recyclé (Figure II.4).

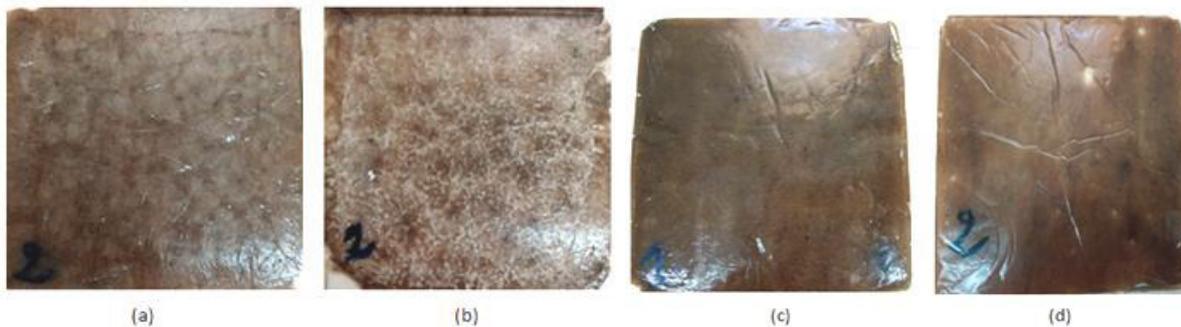


Figure II. 4:Plaques obtenues par recyclage et moulage par fusion : (a) F-1-1, (b)F-1-2, (c)F-2-1, (d) F-2-2.

d) Epreuve d'essai de traction

Les plaques obtenues sont découpées par une découpeuse laser afin d'obtenir une forme et des dimensions selon la norme NF EN ISO 527-2 [46]. Les figures II.5 et II.6 et le tableau II.2 donnent des informations détaillées sur l'éprouvette.

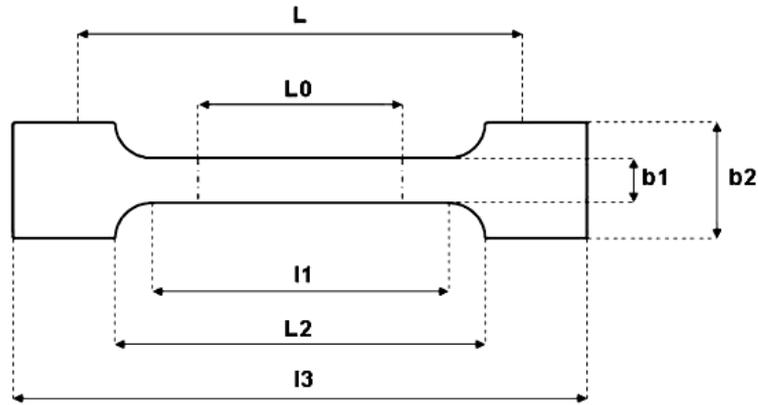


Figure II. 5: Géométrie d'une éprouvette de traction normalisée.

Tableau II. 2: Dimensions normalisées de l'éprouvette de traction[37].

Norme	Type d'éprouvette	l_3	l_1	b_2	b_1	h	l_0	L	Forme
ISO 527-2	1A	> 150	80 ± 4	$20 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$	$50 \pm 0,5$	115	Haltère
l_0 : Longueur de référence				l_3 = Longueur totale					
L : Ecartement entre outillages				b_2 = Largeur dans la zone d'épaulement					
l_1 = Longueur de la partie calibrée étroite				b_1 = Largeur dans la zone de la longueur de référence					
l_2 = Ecartement entre les parties parallèles larges				h = épaisseur de l'éprouvette					



Figure II. 6 : Epreuve d'essai de traction : (a) Originale, (b) Colorée.

II.1.2 Recyclage et moulage par thermo-pressage de PSE

a) Le moule

Pour la préparation des plaques, un deuxième moule est utilisé (Figure II.7). Le moule est dimensionné pour qu'il résiste à la pression appliquée durant l'opération de thermo pressage et pour qu'il prenne la quantité suffisante en déchets de polystyrène expansé. Le moule a des dimensions de $240 \times 100 \times 80$ mm.



Figure II. 7: Le moule Métallique.

b) Le four électrique

Le four est utilisé pour fondre les déchets de polystyrène expansé. Le four représente une enceinte fermée qui garde la température constante. La température de fusion utilisée est la même température utilisée dans la première technique (180°C). Pour l'application d'une pression durant la fusion de la matière, le four est percé dans les deux côtés, supérieur et inférieur (Figure II.8).



Figure II. 8: Four troué utilisé dans le thermo-pressage.

c) Opération de thermo-pressage

Dans l'élaboration des matériaux, plusieurs étapes ont été suivies afin d'obtenir des plaques rectangulaires.

- **Compactage de la matière première**

La première étape est le compactage de déchets de polystyrène expansé. L'objectif de cette étape est de réduire le volume de déchets de polystyrène expansé car le polystyrène expansé présente une masse volumique très faible (de 15 à 25 Kg/m³). La pression appliquée

pour compacter le polystyrène expansé est de 3 à 5 bar avec un temps de maintien de 5 minutes. Cette étape facilite le processus de thermo-pressage (Figure II.9).



Figure II. 9: Les étapes de thermo-pressage.

- **Préparation du four**

Le four est placé dans la presse hydraulique (figure II.9-f) pour l'alimenter électriquement. Un prés-chauffage du four jusqu'à la température de fusion (180°C) est nécessaire, avant commencer l'opération de compactage.

- **Thermo-pressage de la matière**

Pour obtenir des plaques d'épaisseur de 4 mm, des cales sont introduit dans le moule. Les déchets de polystyrène expansé compactés sont placés dans le moule. Après d'avoir une température du four de 180°C environ, le moule est placé dans le four. Une pression de 1.5 à 2.5 bar est appliquée. Deux temps de maintien de la pression sont utilisés. Le tableau suivant

Tableau II. 3: Configuration des matériaux élaborés par le thermo-pressage.

Configuration	Temps de maintient (min)
TP1	90
TP2	120

d) Matériau obtenu par recyclage et moulage par thermo-pressage

Le moule est refroidi à l'eau pendant 10 min pour avoir le matériau rigide. Les plaques obtenues sont découpées de la même forme avec les mêmes dimensions des éprouvettes de traction citées précédemment.

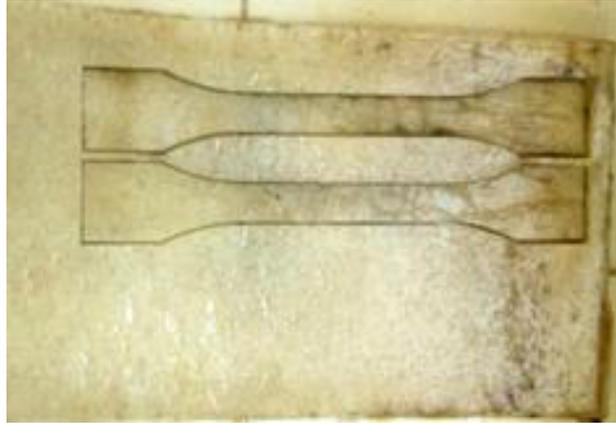


Figure II. 10: Epreuves de traction obtenues par le thermo-pressage.

II.1.3 Matériau composite à base de déchets de PSE et de déchets de palmier dattier

Dans l'élaboration du matériau composite, les fibres des feuillettes sont utilisées comme renfort. Ces feuillettes sont des résidus de taille des palmiers dattiers de l'Oasis de Biskra, Algérie. Ces feuillettes ont été récoltées à la main à partir des feuilles de palmier dattier, et séparées des rachis et du pétiole. Les feuillets ont été nettoyés à l'eau pour enlever la poussière et les impuretés, puis séchés naturellement pendant trois jours afin de réduire la teneur en eau.

Les feuillettes ont été découpées en petits morceaux de 2 à 5 cm de longueur pour faciliter la procédure de broyage. Le broyage des feuillettes découpées est effectué à l'aide d'un broyeur domestique type SEB. Le tamisage du mélange obtenu a été effectué en utilisant 2 tamis métalliques de diamètres 0,315-0,5mm pour obtenir une taille granulométrique de fibres (Figure II.11). Chaque quantité de mélange a été tamisée manuellement durant 10 min afin d'avoir des fibres de dimensions similaires [37].

La matrice utilisée dans l'élaboration du matériau composite est obtenue par le recyclage du polystyrène expansé, vu précédemment. La technique utilisée dans l'élaboration du matériau composite est le thermo-pressage du PSE, car la première méthode de recyclage dégrade les fibres de palmier dattier. Le tableau suivant présente la proportion massique entre le renfort et la matrice pour l'élaboration du composite.

Tableau II. 4: Proportion massique entre le renfort/matrice.

Matériau	Renfort (%)	Matrice (%)
C1	10	90
C2	15	85



Figure II. 11: Fibre des feuilletes utilisées comme renfort.

La figure II.12 Présente la plaque composite obtenue par thermo-pressage du PSE et fibre de palmier dattier. A partir de cette figure on peut observer une distribution non uniforme des fibres dans la matrice. Cette distribution est due à la difficulté trouver dans la mise en forme de la matière. Cette plaque est découpée avec découpeuse laser pour obtenir des éprouvettes de tractions selon la norme EN ISO 527-2[46] .



Figure II. 12: Plaque composite PSE/fibres de palmier dattiers

II.2 Méthode de caractérisation expérimentale

II.2.1 Essai de traction

a) Eprouvettes d'essai

Le type de charge axiale se rencontre fréquemment dans les projets de structures et de machines. Pour reproduire au laboratoire ce type de charge, on fixe une éprouvette dans les mâchoires d'une machine d'essai à engrenage mue électriquement ou hydrauliquement. Ces deux types de machine sont couramment utilisés dans les laboratoires d'essai des matériaux pour appliquer une tension axiale.

Pour normaliser les méthodes d'essai des matériaux, l'American Society for Testing Materials a élaboré des spécifications utilisées dans toute l'Amérique. Pour les essais en tension et compression axiales, ces normes prévoient toute une série d'éprouvettes pour divers matériaux métalliques et non métalliques. Par exemple, dans le cas des éprouvettes de type prismatique, pour les plaques de métal l'épaisseur de l'éprouvette est égale à 4,76mm d'épaisseur (Figure II.13-a) et pour l'éprouvette cylindrique, utilisée pour les métaux, le diamètre est supérieur à 38,10mm (Figure II.13-b).

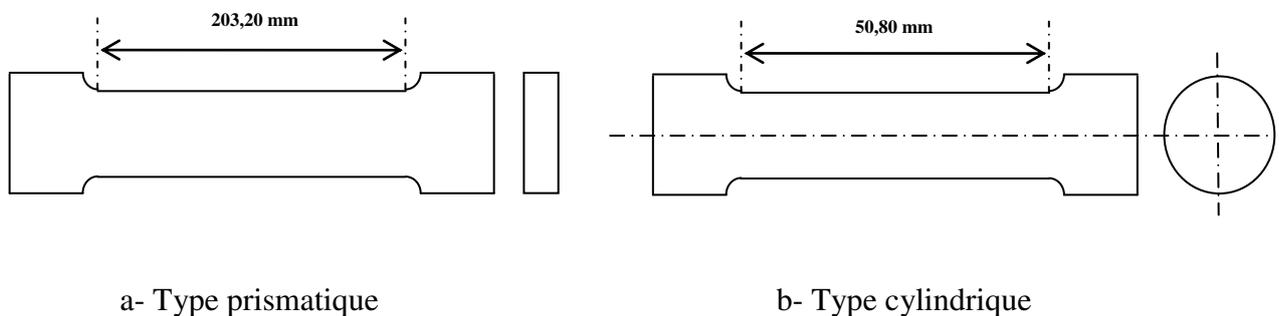


Figure II. 13:Type des éprouvettes d'essai de traction.

Les dimensions indiquées sont celles spécifiées par l'A.S.T.M, mais les extrémités des éprouvettes peuvent présenter la forme voulue pour s'adapter aux mâchoires de la machine d'essai. Comme on peut le voir sur la figure II.13, la partie centrale est un peu moins large que les extrémités, avec un congé qui répartie la charge pour que la rupture ne se produise pas dans les parties fixées dans les mâchoires. Les arrondis sont prévus pour éviter les concentrations de contrainte à la transition entre les deux portions d'inégale longueur.



Figure II. 14: Epreuve dans la machine de traction.

Tableau II. 5: Dimensions de différents types d'éprouvettes de traction selon la norme NF EN ISO 527[47].

Type d'éprouvette		1 A	1 B	1 BA	1 BB	5 A	5 B	2	4	5
Longueur totale	L_3	≥ 150	≥ 150	≥ 75	≥ 30	≥ 75	≥ 30	≥ 150	152	≥ 115
Longueur partie calibrée	L_1	80 ± 2	$60 \pm 0,5$	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$	25 ± 1	$12 \pm 0,5$			33 ± 2
Rayon	r	20 à 25	≥ 60	≥ 30	≥ 12					
Petit rayon	r_1					$8 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$		22	14 ± 1
Grand rayon	r_2					$12,5 \pm 1$	$3 \pm 0,1$		25,4	25 ± 2
Distance initiale entre mâchoires	L	115 ± 1	$L_2 \cdot 0^5$	$L_2 \cdot 0^2$	$L_2 \cdot 0^1$	50 ± 2	20 ± 2	100 ± 5	73,4	80 ± 5
Distance entre parties larges à faces parallèles	L_2	104 à 113	106 à 120	58 ± 2	23 ± 2					
Largeur aux extrémités	b_2	$20 \pm 0,2$	$20 \pm 0,2$	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$	$12,5 \pm 0,1$	$6 \pm 0,5$	10 à 25	38	25 ± 1
Largeur partie étroite	b_1	$10 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$5 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$	$4 \pm 0,1$	$2 \pm 0,1$		$25,4 \pm 0,1$	$6 \pm 0,4$
Épaisseur recommandée	h	$4 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$ ou ≤ 1	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Longueur de référence	L_0	$50 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$	$20 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$	$50 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$	$25 \pm 0,25$
Norme ISO		527-2	527-2 (537-3)	527-2	527-2	527-2	527-2	527-3	527-3	527-3
Recommandations particulières		Moulées usages multiples	Usinées (feuilles rigides)	Proportionnel type 1B 1:2	Proportionnel type 1B 1:5	Proportionnel type 5				Feuilles souples et/ou résistance élevée
		Recommandées		Petites éprouvettes			Recommandées			

Vitesse = 1 % (L_0)/min
Les cotes sont en millimètres.

b) Principe de l'essai de traction

L'essai consiste à exercer sur une éprouvette de forme cylindrique ou parallélépipédique (plate) des forces croissantes (Figure II.15), qui vont la déformer progressivement puis la rompre.

En appliquant graduellement la charge par incrément, l'allongement total est mesuré sur la longueur de référence l_0 , pour chaque incrément de charge F et ceci jusqu'à rupture de

l'éprouvette. La contrainte normale σ peut être calculée pour toute charge axiale en utilisant

l'équation $\sigma = \frac{N}{S}$.

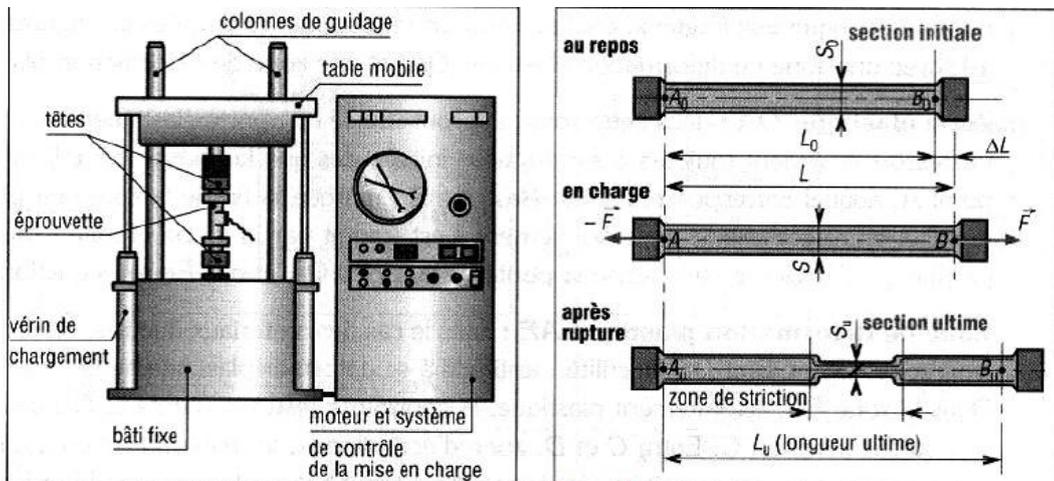


Figure II. 15: Essais de traction.

La déformation est aussi calculée avec l'équation $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$. Après avoir un certain nombre de valeurs numérique, on peut tracer la courbe ou le diagramme Contrainte/Déformation. La courbe Contrainte/Déformation (Figure II.16) peut servir à caractériser plusieurs propriétés mécaniques du matériau :

- Limite de proportionnalité : point A
- Limite élastique (σ_e ou R_e): coordonnées d'un point qui coïncide presque avec le point A.
- Domaine élastique et domaine plastique :
 - ❖ Du point O jusqu'à A c'est le domaine élastique.
 - ❖ Du point A jusqu'à point de la rupture B c'est le domaine plastique.
- Seuil de plasticité «point C» : notée $\sigma_{e0,2}$ ou $R_{e0,2}$, pour lequel il y a accroissement de la déformation sans augmentation de la contrainte.
- Résistance à la tension σ_r ou R_r : le point D, ordonnée maximale de la courbe.
- le point E est le point de rupture.
- Coefficient de striction $Z\%$: $Z\% = \frac{S_u}{S_0} \cdot 100$

Avec : S_u : Section ultime après rupture S_0 : section initiale de l'éprouvette.

- Le module d'élasticité longitudinal E .
- Le coefficient de poisson ν [44].

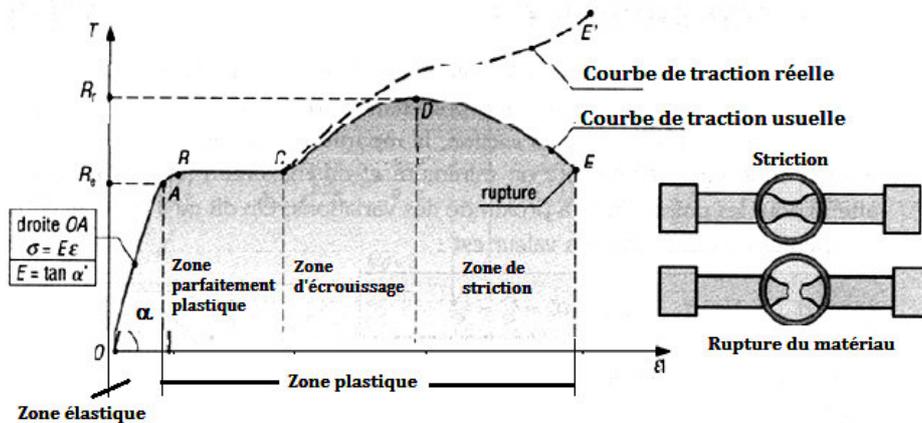


Figure II. 16: La courbe contrainte/déformation.

c) Essai expérimental

Les différents matériaux élaborés, matériau 100% PSE et matériaux composites, sont caractérisés expérimentalement par des essais de traction. Les propriétés de traction de ces matériaux, à savoir la résistance à la traction, le module de Young et le coefficient de Poisson ont été déterminées en utilisant une machine d'essai universelle Instron 5969. Une cellule de charge de 10kN est utilisée et une longueur de jauge de 50mm est considérée et une vitesse de chargement de 1 mm/min a été appliquée (Figure II.17).



Figure II. 17: d'essai de traction.

Pour la détermination du coefficient de Poisson, un dispositif vidéo extensomètre avancé est placé sur la machine d'essai et calibré pour enregistrer les mesures des

déformations transversales et axiales de l'échantillon. Pour les mesures des déformations transversales et longitudinales, des marques de jauge sur l'échantillon sont nécessaires pour définir la longueur de la jauge. Ceux-ci doivent être à peu près équidistants du point médian et la distance entre les marques doit être mesurée avec une précision de 1% ou mieux (Figure II.18).



Figure II. 18: des éprouvettes avec le point de mesure de coefficient de Poisson.

Les marques de jauge ne doivent pas être rayées, perforées ou imprimées sur l'échantillon d'essai d'une manière qui pourrait endommager le matériau testé. il faut veiller à ce que le support de marquage n'ait pas d'effet néfaste sur le matériau soumis à l'essai et, dans le cas de lignes parallèles, soit aussi étroit que possible [48].

Au minimum et pour chaque matériau, trois éprouvettes de traction ont été testées pour le calcul des propriétés mécaniques. Ces propriétés ont été calculées selon la norme EN ISO 527-1[48]. Le module de Young est calculé dans la zone de déformation comprise entre $\varepsilon_1 = 0,0005$ et $\varepsilon_2 = 0,0025$ selon l'équation suivante [48]:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Avec : σ_1 : La contrainte qui correspond à la déformation ε_1 .

σ_2 : La contrainte qui correspond à la déformation ε_2 .

Le coefficient de Poisson ν est calculé selon l'équation suivante [48] :

$$\nu = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}$$

Avec : ε_T : Déformation transversale.

ε_L : Déformation longitudinale.

II.2.2 Types de ruptures des matériaux

Chaque matériau a un comportement mécanique et un type de rupture qui dépend des ses propriétés. La figure suivante présente différents types de rupture de certains matériaux.

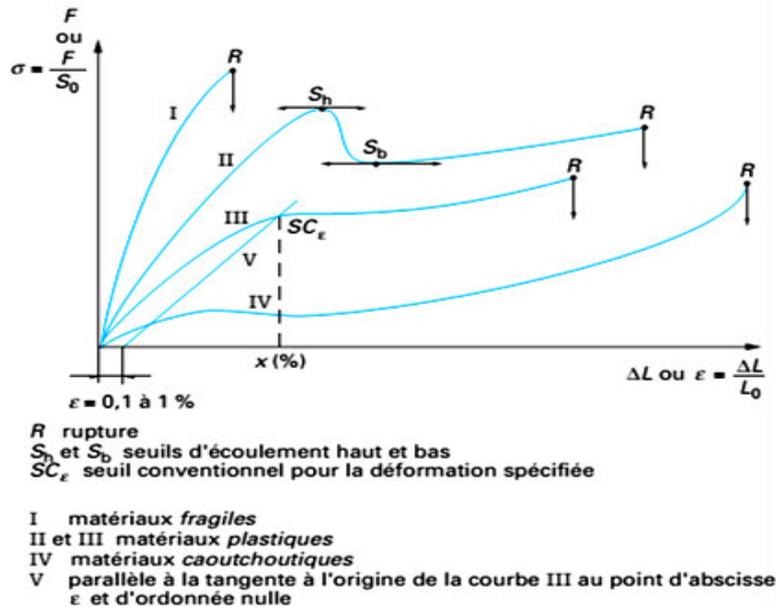


Figure II. 19: Courbes de traction types des plastiques[47].

a) Rupture des polymères

Les polymères ont une large gamme de comportements mécaniques. Fragiles à basse température, ils deviennent plastique puis viscoplastiques, puis encore caoutchouteux et enfin visqueux.

Au fur et à mesure que la température augmente, entre -20°C et $+20^\circ\text{C}$, un polymère peut passer par tous les états mécaniques. Son module et sa résistance à la traction peuvent varier d'un facteur supérieur à 10^3 . L'état mécanique d'un polymère dépend de sa masse moléculaire et de la température, ou plus précisément de l'écart entre sa température et T_g , température de transition vitreuse [49].

b) Matériaux fragiles

Le comportement du matériau fragile, Courbes de type I, est obtenus avec les matières therm durcissables, les thermoplastiques ne présentant ce comportement qu'à basse température et (ou) à vitesse élevée de sollicitation. La contrainte et l'allongement à la rupture ainsi que le module d'Young sont alors calculés.

c) Matériaux ductiles avec seuil d'écoulement

Le comportement du matériau matériaux ductiles avec seuil d'écoulement, Courbes de type II, est trouvé dans un grand nombre de matières thermoplastiques au voisinage de la température ambiante.

Le seuil d'écoulement haut (S_h) correspond à l'apparition du phénomène de striction. Une réduction de section pouvant aller jusqu'à 1/3 pour les matériaux semi-cristallins s'amorce et se propage ensuite, au seuil d'écoulement bas (S_b) à charge quasiment constante, jusque dans les têtes d'éprouvettes, avant d'atteindre la rupture pour des allongements pouvant atteindre 1000 %. Cet étirage se traduit par une très forte orientation moléculaire. Le seuil d'écoulement est quelquefois baptisé à tort seuil de fluage ou limite élastique. La limite élastique, ou mieux, limite de linéarité, correspond au point de décollement de la tangente à l'origine et de la courbe de comportement.

Les caractéristiques que l'on donne le plus souvent sont la contrainte au seuil d'écoulement haut et l'allongement à la rupture. La contrainte à la rupture n'a pas de signification physique compte-tenu de la réduction de section. En revanche, il est regrettable que l'allongement au seuil d'écoulement haut figure encore peu dans les notices techniques ; il constitue l'allongement limite que peut supporter le matériau sans se dégrader et est donc une référence importante pour établir des courbes isométriques de durée de vie, utilisables dans la conception de structures. En outre cette caractéristique varie peu avec la vitesse de traction et la température ; elle est de l'ordre de 4 à 10 % pour la plupart des thermoplastiques.

Les caractéristiques au seuil bas sont moins utilisées, bien qu'elles aient une importance pratique dans certains processus de mise en œuvre tels que l'étirage.

d) Matériaux ductiles sans seuil d'écoulement

Le comportement des matériaux ductiles sans seuil d'écoulement, Courbes de type III est trouvé dans certains polymères cristallins. Ils présentent un comportement plastique sans seuil très marqué, typique des polymères résilients. Outre les paramètres de rupture, est défini un seuil conventionnel S_{Ce} soit à l'intersection de la droite parallèle à la tangente à l'origine de la courbe III à partir d'une déformation spécifiée (0,1 à 1 %) d'après la norme ASTM D 638, soit à l'intersection de la perpendiculaire à l'axe des abscisses pour une déformation prescrite (%) d'après la norme NF EN ISO 527.

e) Matériaux caoutchouc

Le matériau caoutchouc, Courbes du type IV, a un comportement des élastomères. Ils sont obtenus à partir des polymères amorphes dans une température de transition vitreuse. Dans ce type de matériau on détermine la contrainte et l'allongement à la rupture, et souvent un module sécant à 100 ou 200 % d'allongement (NF T 46-002) [47].

Chapitre III

Caractérisation expérimentale des matériaux

III Caractérisation expérimentale des matériaux

Dans cette partie, une étude expérimentale sur les matériaux élaborés est réalisée. Cette étude est basée sur les résultats expérimentaux obtenus des essais de tractions réalisés. Les propriétés mécaniques des matériaux, tel que le module de Young, coefficient de Poisson, Module de cisaillement et la résistance à la traction sont déterminées. Afin d'évaluer les différentes méthodes utilisées dans l'élaboration des matériaux, une étude comparative sur les propriétés mécaniques obtenues est réalisée.

III.1 Matériaux 100% polystyrène expansé recyclé

III.1.1 Propriétés mécanique du matériau obtenu par fusion

Dans l'élaboration des matériaux par le recyclage et moulage par fusion deux facteurs ont été pris en compte, le nombre de plaques chauffante et le temps de maintien. Le tableau suivant présente les différents cas étudiés.

Tableau III. 1 : Différents cas étudiés par le recyclage par fusion.

Tests	Les cas étudiés
F-1-1	Recyclage par fusion sur une seule surface à 20 min
F-1-2	Recyclage par fusion sur une seule surface à 30 min
F-2-1	Recyclage par fusion sur deux surfaces à 20 min
F-2-2	Recyclage par fusion sur deux surfaces à 30 min

a) Courbe contrainte déformation

Les figures III.1 représente les courbes contrainte/déformation des essais de traction de chaque configuration. Pour chaque configuration, trois éprouvettes ont été testées. Les figures F-1-1 et F-1-2 indiquent les matériaux élaborer par fusion à une face avec des temps de maintien de 20 et 30 min respectivement. Les figures F-2-1 et F-2-2 représentent les matériaux élaborer par fusion à deux faces avec des temps de maintien de 20 et 30 min respectivement.

D'après ces figures, on peut observe que tous les courbes sont composées d'une partie linéaire, qui représente le domaine élastique du matériau. Par contre, il y a l'absence de la partie plastique, qui signifie que le matériau obtenus par fusion est un matériau fragile.

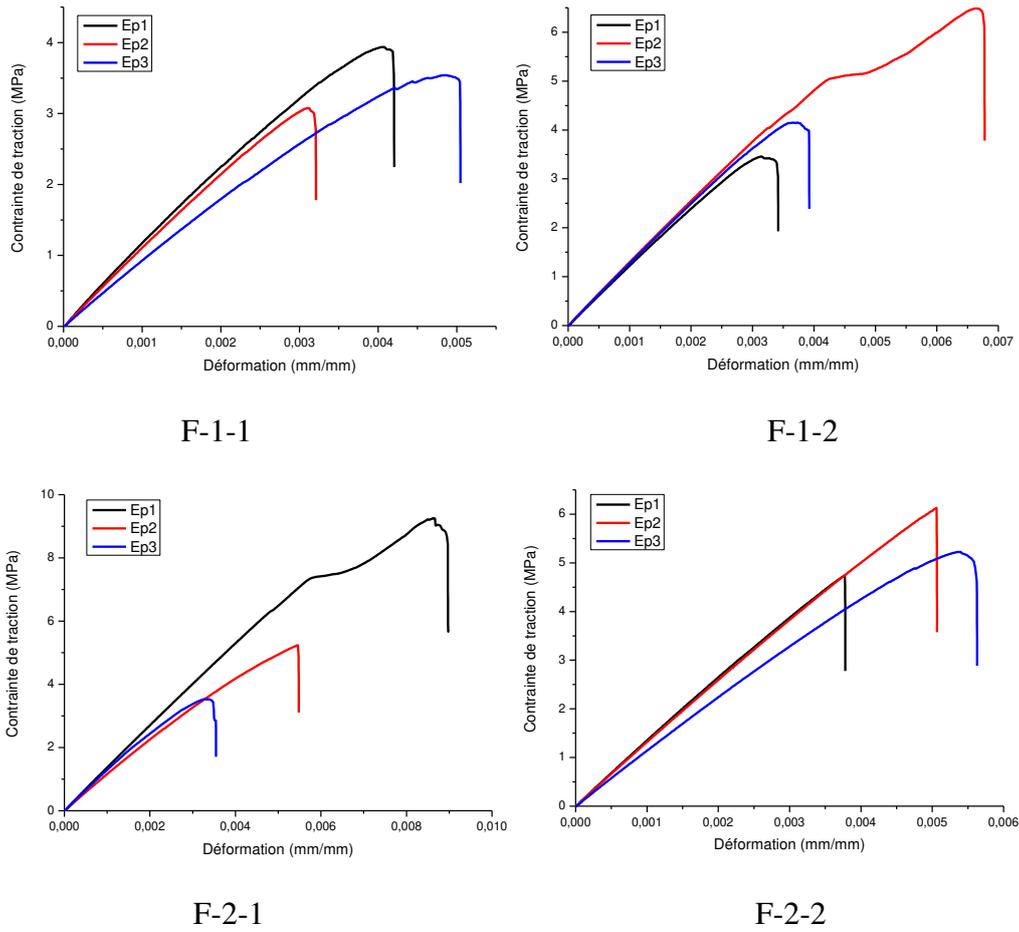


Figure III. 1: Courbes contrainte/déformations des matériaux 100% PSE obtenus par fusion.

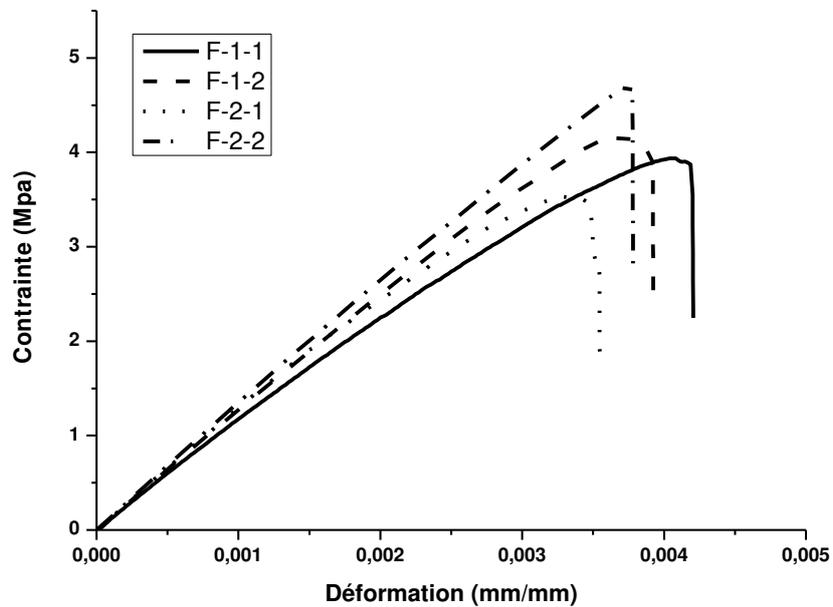


Figure III. 2: Courbes contrainte/déformation typiques des matériaux obtenus par fusion.

La figure III. 2 montre les courbes typiques des différents matériaux obtenus par fusion. D'après cette figure, on observe généralement que les pentes obtenues sont presque similaires.

Cela signifie que les modules d'élasticité E obtenus sont proches, avec a module de Young maximal de 1.32 GPa. Par contre, on observe une augmentation dans la résistance à la traction avec l'augmentation du temps du maintient (temps de fusion) avec la fusion à deux faces. L'augmentation du temps de fusion et la fusion à deux faces homogénéise la structure du matériau et réduit les bulles d'air dans la structure qui explique l'augmentation de la résistance à la traction (3.07-4.75 MPa).

b) Module d'élasticité

La figure III.3 montre les valeurs moyennes des modules d'élasticités E des matériaux PSE obtenus par fusion. Les modules d'élasticité E représente la pente de la partie linéaire de la courbe contrainte/déformation. Pour chaque cas, la valeur moyenne est calculée à partir des nombres d'essais.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}$$

E_i : Module d'élasticité de chaque test.

n : Nombre de tests réalisés pour chaque cas.

A partir de la figure III.3 on observe que, dans le cas de fusion par une seul face, l'augmentation dans le temps de fusion, de 20 minutes à 30 minutes, augmente le module d'élasticité (Cas F-1-1 et F-1-2). Par contre, dans le cas ou la fusion est faite par deux surface on obtient le même module d'élasticité (Cas F-2-1 et F-2-2). L'augmentation de temps de fusion n'a aucune influence sur le module d'élasticité. On peut aussi observer qu'on peut obtenir un module d'élasticité de 1024,84 à 1247,70 MPa avec l'augmentation de temps de fusion de 20 à 30 minutes (Cas F-1-2 et F-2-1). L'écart type de calcul est satisfaisante avec un écart minimal de 42.06 et maximale de 112.78

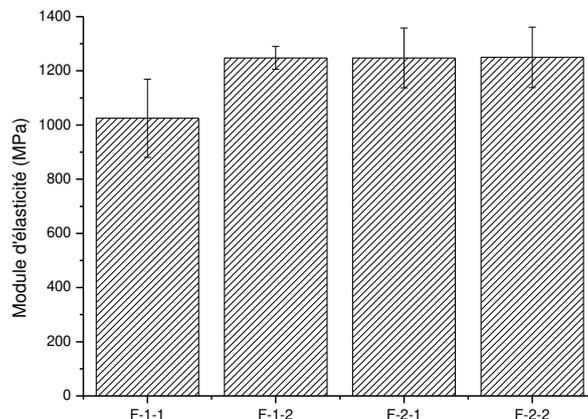


Figure III. 3: Modules d'élasticités des matériaux PSE obtenus par fusion.

c) Résistance à la traction

La même observation a également été observée dans le cas de la contrainte maximale présentée dans (la figure III.4). Les valeurs moyennes des contraintes maximales de chaque cas et les l'écart types sont calculés de la même manière précédente (Cas module d'élasticité et écart type). D'après la figure III.4, on remarque que la contrainte maximale à la traction du matériau augmente avec l'augmentation de temps de fusion (Cas F-1-1 et F-1-2). De la figure III.4, on constate que la fusion avec deux faces avec un temps de 20 min donne une résistance à la traction meilleure que les autres cas étudiés.

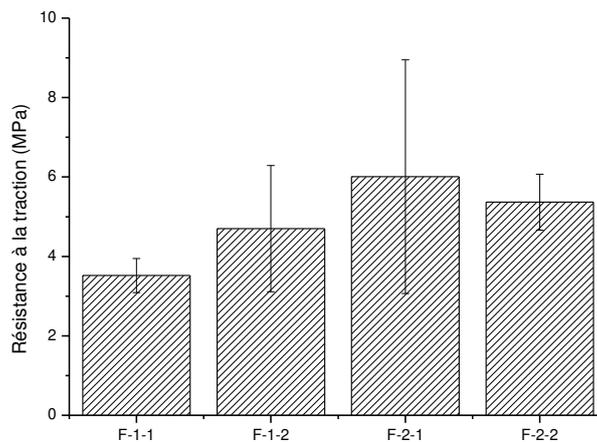


Figure III. 4: Les contraintes maximales des matériaux PSE obtenus par fusion.

d) Coefficient de Poisson

Les coefficients de Poisson obtenus varient de 0.144 à 0.358 (Figure III.5). Dans la littérature, le coefficient des polymères varie entre 0.3 et 0.5 [50]. Alors, dans les différents cas étudiés, seul le premier cas (F-1-1) qui est considéré comme un polymère. Dans ce cas, le matériau est très élastique par rapport aux autres cas. Par contre, les autres matériaux deviennent plus rigides et leur structure change. Les coefficients de Poisson ont une grandeur de 0.2. De la littérature, cette valeur correspond à la valeur des matériaux céramiques [50]. Donc on peut constater que lors de la fusion la structure de polystyrène expansé change avec le temps d'une structure polymérique à une structure céramique. Le tableau III.2 récapitule les propriétés mécaniques du PSE recyclé par fusion de différents cas étudiés.

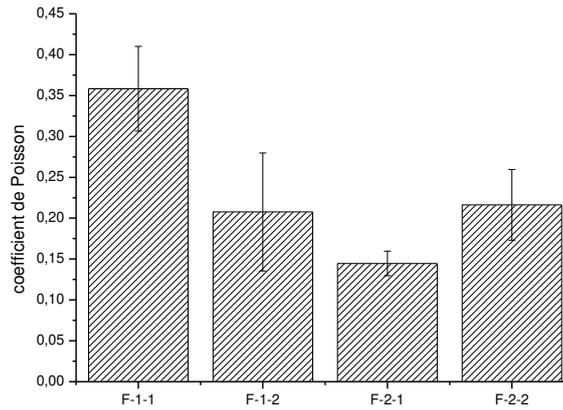


Figure III. 5 : Les coefficients de Poisson des matériaux PSE obtenus par fusion.

Tableau III. 2: Tableau récapitulatif des propriétés des matériaux des PSE obtenus par fusion.

Test F-1-1	1	2	3	Valeur moyenne	Ecart type
E [Mpa]	1128.35	1086.24	859.92	1024.84	144.36
ν	0.303	0.364	0.406	0.358	0.051
G [Mpa]	441.07	403.47	311.46	385.33	66.68
σ_{tM} [Mpa]	3.936	3.077	3.539	3.517	0.429
Test F-1-2	1	2	3	Valeur moyenne	Ecart type
E [Mpa]	1201.77	1284.35	1256.94	1247.69	42.06
ν	0.126	0.233	0.263	0.207	0.072
G [Mpa]	543.89	522.32	506.73	521.31	14.10
σ_{tM} [Mpa]	3.45	6.48	4.15	4.69	1.58
Test F-2-1	1	2	3	Valeur moyenne	Ecart type
E [Mpa]	1360.54	1139.54	1243.02	1247.70	110.57
ν	0.140	0.131	0.161	0.144	0.015
G [Mpa]	597.81	505.22	535.93	546.32	47.16
σ_{tM} [Mpa]	9.25	5.23	3.53	6.00	2.94
Test F-2-2	1	2	3	Valeur moyenne	Ecart type
E [Mpa]	1320.44	1307.63	1121.24	1249.77	111.49
ν	0.243	0.239	0.166	0.216	0.043
G [Mpa]	533.01	530.85	484.05	515.97	27.66
σ_{tM} [Mpa]	4.74	6.12	5.22	5.36	0.70

III.1.2 Propriétés mécanique du matériau obtenu par thermo-pressage

Cette partie présente les propriétés mécaniques de PSE recyclé par la méthode thermo-pressage. Cette méthode est basée sur la fusion thermique des déchets de polystyrène expansé sous pression. Par la suite, les propriétés mécaniques obtenues sont relatives aux conditions de température, pression et temps (Tableau III.3).

Tableau III. 3: Conditions du thermo-pressage des déchets de PSE.

Tests	Temps (min)	Pression appliquée (Bar)	Température (°C)
TP1	90 et 120	1.5-2.5	160-190
TP2	90 et 120	1.5-2.5	160-190

a) Courbe contrainte déformation

Les figures III.6 représente les courbes contrainte/déformation des essais de traction des matériaux obtenus par thermo-pressage. Pour chaque configuration, un minimum de trois éprouvettes ont été testées. Les figures TP1 et TP2 représentent les matériaux élaborer par thermo-pressage avec des temps de maintient de 90 et 120 minutes respectivement.

D'après ces figures, les mêmes observations des matériaux obtenus par fusion, cité précédemment, ont été observés. Le matériau est un matériau élastique avec une rupture fragile.

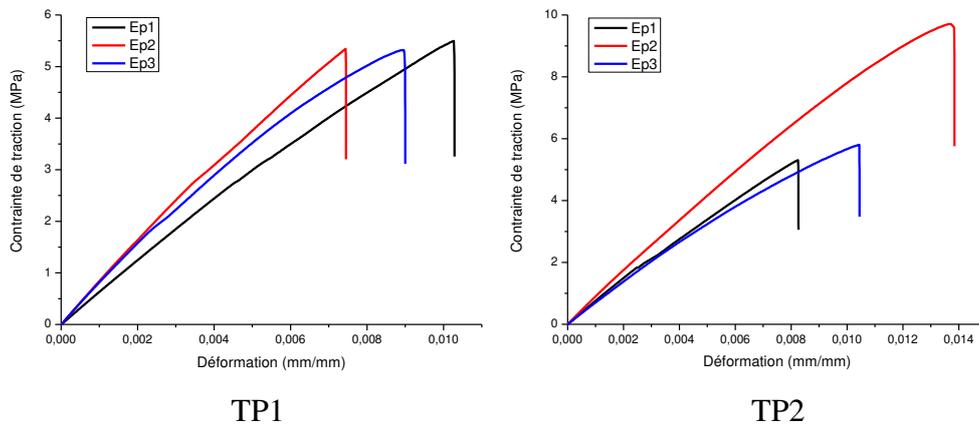


Figure III. 6 : Courbes Contrainte/déformation des matériaux PSE obtenus par thermo-pressage.

La figure III.7, représente l'effet de temps de maintient sur le comportement mécanique des matériaux. On peut observer que lorsque on augmente le temps de maintient, de 90 min (TP1) à 120 min (TP2), le matériau devient plus ductile.

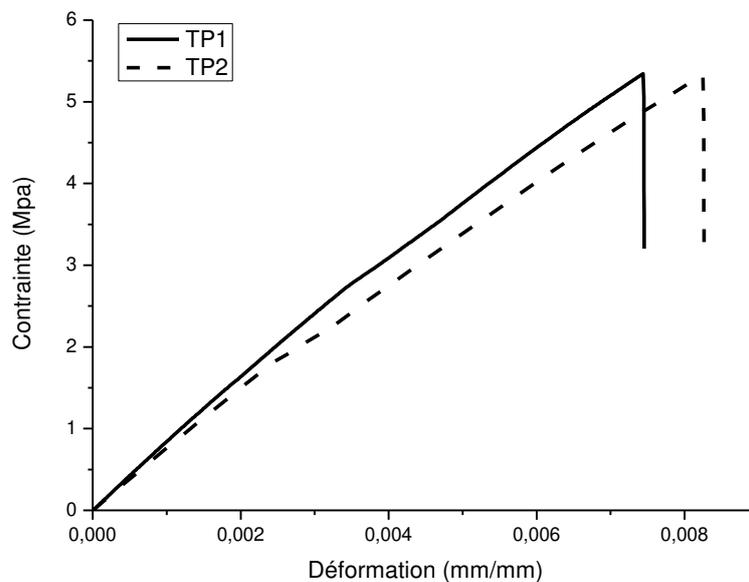


Figure III. 7 : Courbes typiques des matériaux PSE obtenus par thermo-pressage.

b) Module d'élasticité

La figure III.8, représente les modules d'élasticité obtenus de chaque matériau. D'après cette figure on peut observer que les modules d'élasticité obtenus sont similaires malgré l'augmentation du temps de maintien de 90 min à 120 min. On peut constater que le temps de 90min est satisfait pour effectuer l'opération de thermo-pressage. L'augmentation du temps de maintien n'a pas une grande influence sur le module d'élasticité.

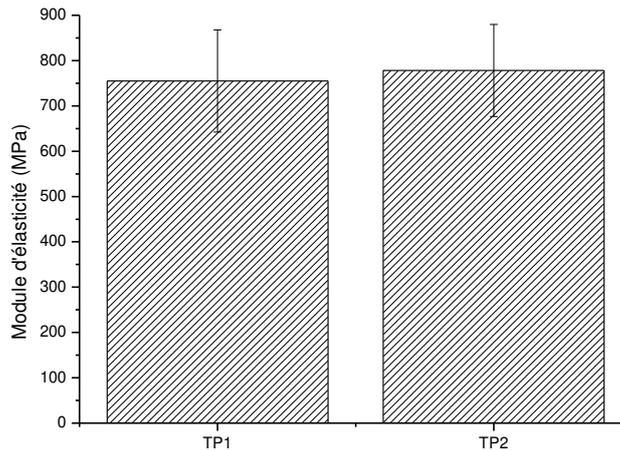


Figure III. 8 : Module d'élasticité des matériaux en PSE obtenus par thermo-pressage.

c) Résistance à la traction

La résistance à la traction des matériaux PSE obtenus par thermo-pressage sont montrés dans la figure III.9. D'après cette figure, on peut observer que l'augmentation du temps de maintien dans l'opération de thermo-pressage améliore la résistance du matériau. Cette amélioration est due au structure plus homogène du matériau obtenu, dans le cas de TP2 (Temps de maintien 120 min), que le matériau à TP1 (Temps de maintien 90 min). L'augmentation de temps de maintien améliore la résistance à la traction du matériau.

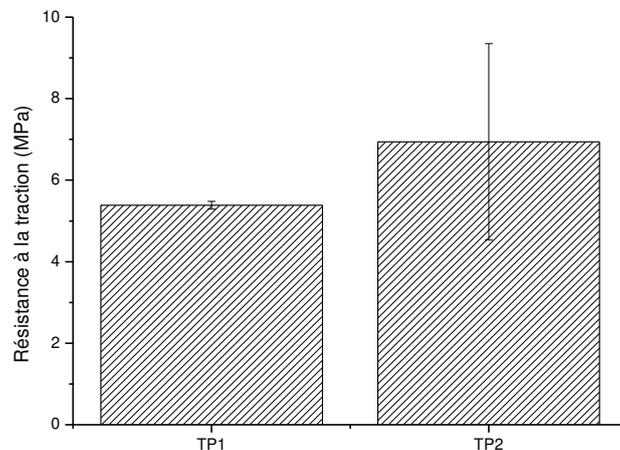


Figure III. 9 : Résistances des matériaux en PSE obtenus par thermo-pressage.

d) Coefficient de Poisson

Les coefficients de Poisson obtenue des matériaux obtenus pat thermo-pressage sont montrés dans la figure III.10. Les coefficients de Poisson obtenus, généralement sont similaires à celle obtenus par fusion. Le matériau obtenu par thermo-pressage peuvent avoir un comportement d'un matériau polymérique à 120 min et un comportement d'un matériau céramique à 90 min.

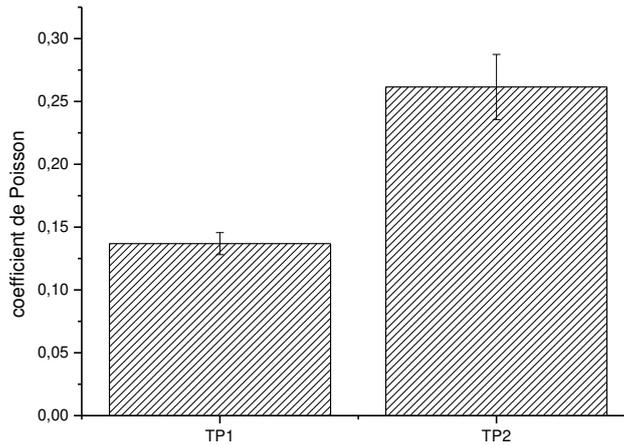


Figure III. 10: Coefficients des matériaux en PSE obtenus par thermo-pressage.

Le tableau III.4 récapitule les propriétés mécaniques du PSE recyclé par thermo-pressage de différents cas étudiés.

Tableau III. 4: Tableau récapitulatif des propriétés des matériaux des PSE obtenus par thermo-pressage.

TP1	1	2	3	Valeur moyenne	Ecart type
E [Mpa]	626.30	836.50	802.26	755.02	112.77
ν	0.133	0.146	0.130	0.136	0.088
G [Mpa]	277.28	367.19	356.73	333.73	49.16
σ_{tM} [Mpa]	5.49	5.34	5.32	5.38	0.09
TP2	1	2	3	Valeur moyenne	Ecart type
E [Mpa]	753,36	889,75	691,45	778,19	101,45
ν	0,269	0,282	0,232	0,261	0,025
G [Mpa]	298,82	350,08	288,40	312,43	33,01
σ_{tM} [Mpa]	5,30	9,70	5,80	6,93	2,41

III.2 Matériaux composite à base de PSE recyclé et de déchets de palmier dattier

Cette partie représente une étude expérimentale sur les matériaux composites élaborés (Tableau III.5). Afin de voir l'influence du renfort sur les propriétés mécaniques du matériau, les propriétés mécaniques des matériaux composites obtenus sont comparées avec les propriétés mécaniques des matériaux PSE obtenus par la même technique (Thermo-pressage).

Tableau III. 5: Composition des matériaux composites élaborés.

Tests	Fibres Palmier Dattiers	Matrice PSE
C1	10%	90%
C2	15%	85%

III.2.1 Propriétés mécanique du matériau composite obtenu par thermo-pressage

e) Courbe contrainte déformation

Les figures III.11, montrent les résultats d'essais de traction des deux composites élaborés. Pour chaque composite, trois éprouvettes ont été testé pour la détermination des propriétés mécanique. Le comportement du matériau reste similaire au comportement du matériau 100 PSE, avec des petits changements dans le type de rupture.

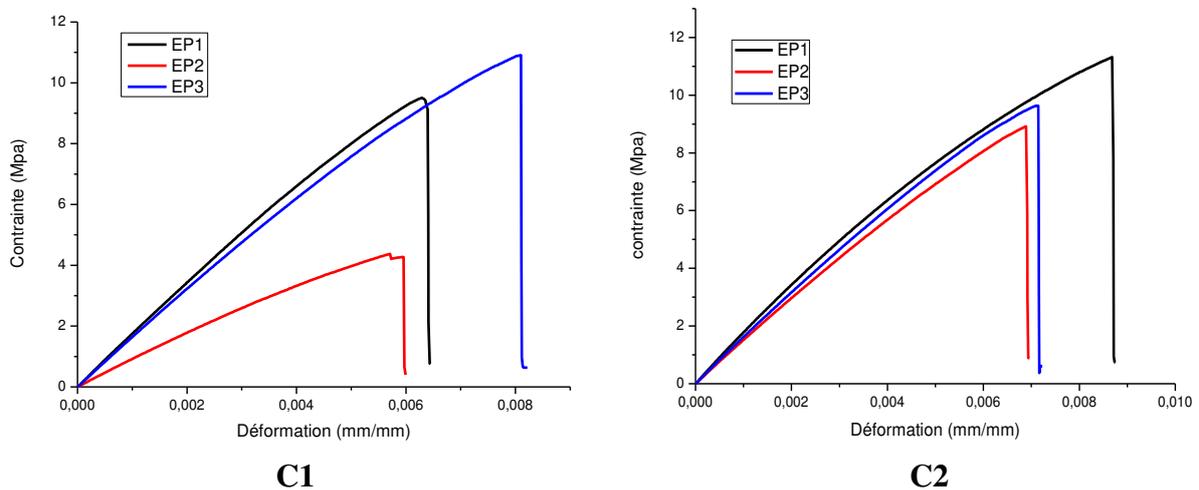


Figure III. 11: Courbe contrainte/déformation des matériaux composites obtenus par thermo-pressage.

Les courbes typiques (Figure III.12), montrent que l'augmentation de la quantité massique du renfort, de 10% (C1) à 15% (C2), dans le composite améliore les propriétés du matériau composite.

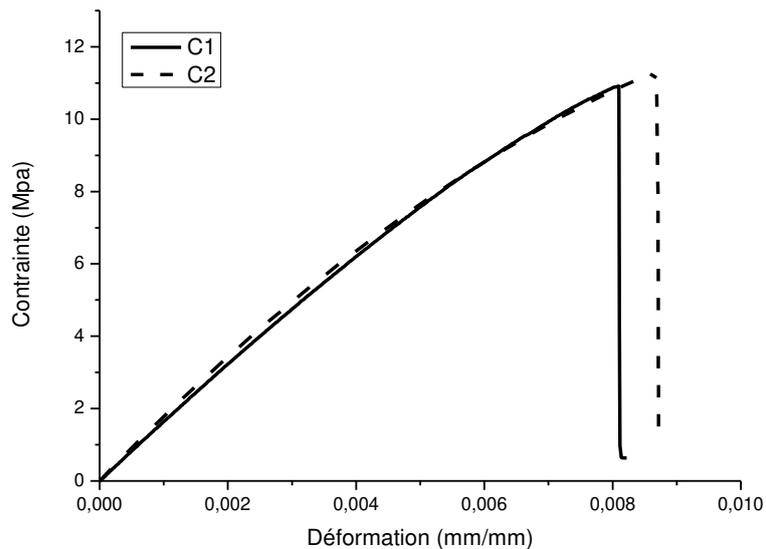


Figure III. 12: Courbes types des matériaux composites.

f) Module d'élasticité

Les modules d'Young obtenus des composites PSE/Fibre de palmier dattiers sont montrés dans li figure III.13. Il apparaît clairement que la rigidité augmente au fur et à mesure que la quantité du renfort augmente. Cette augmentation est due principalement l'adhésion interfaciale polystyrène/fibre. Cette adhésion assure la transmission des efforts de la matrice aux fibres qui produit une résistance supplémentaire au composite par rapport à la résistance de la matrice PSE seule. Une amélioration dans le module de Young de 83% peut être obtenue avec une quantité de renfort de 10%, et une amélioration de 96% si la quantité de renfort est de 15%.

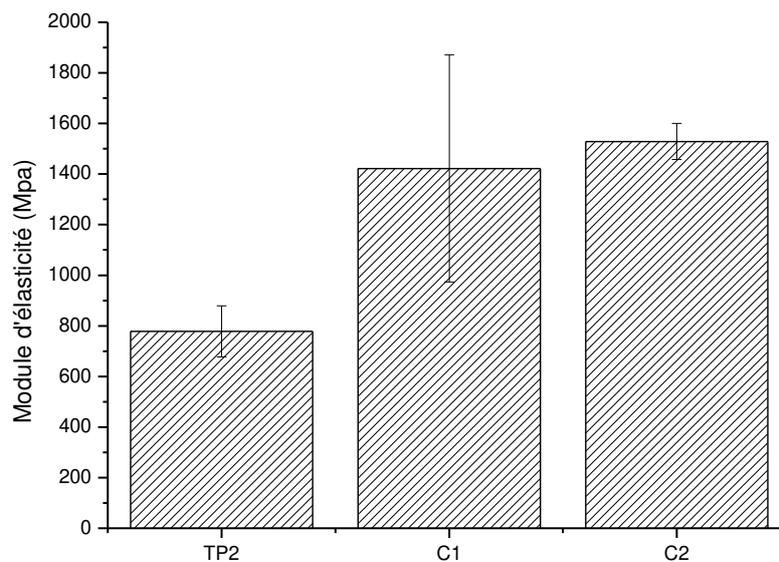


Figure III. 13: Module d'élasticité des matériaux PSE et des composites PSE/Fibres de palmier dattier.

g) Résistance à la traction

Pour les composites thermoplastiques, la résistance à la traction, qui exprime la contrainte maximale que la matière peut supporter, avant sa rupture, peut varier fortement en fonction de la nature des interactions entre la matrice et le renfort.

Comme pour le module d'Young, la résistance à la traction des composites élaborés dans ce travail (PSE/Fibre de palmier dattiers) subit une augmentation au fur et à mesure que la proportion massique du renfort augmente (Figure III.14). Alors, le renfort rend le matériau PSE recyclé plus résistant car les contraintes supportées par la matrice seront transférées aux fibres.

Si on compare la résistance à la traction du matériau PSE recyclé avec celle des matériaux composite PSE/fibres de palmier dattier, on peut avoir une amélioration dans la résistance à la traction de 19% avec un renfort de 10% et de 43.5% avec un renfort de 15%.

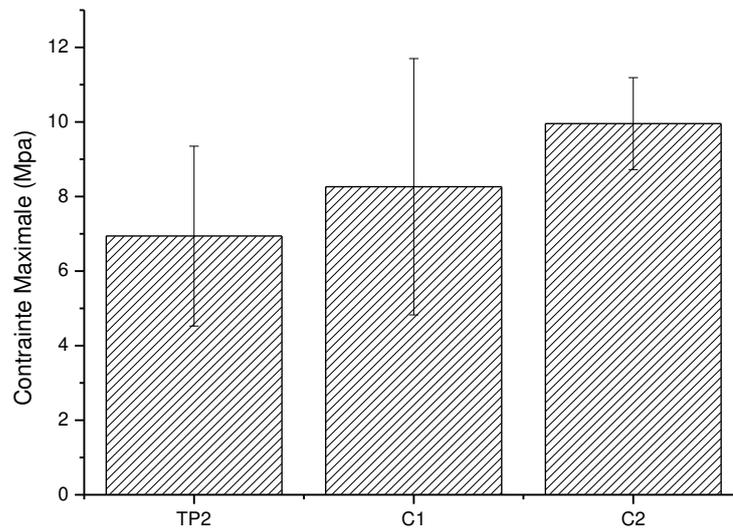


Figure III. 14: Résistance à la traction du matériau PSE et des composites PSE/Fibres de palmier dattiers

h) Coefficient de Poisson

Contrairement aux résultats obtenus précédemment, le coefficient de Poisson des matériaux composites obtenus sont entre 0,35-0,4 (Figure III.15). Cet intervalle est inclus dans l'intervalle des coefficients de Poisson des polymères qui est de 0.25-0.5. Le tableau III.6 récapitule les propriétés mécaniques des matériaux PSE recyclé et les composite PSE/Fibres de palmier dattier.

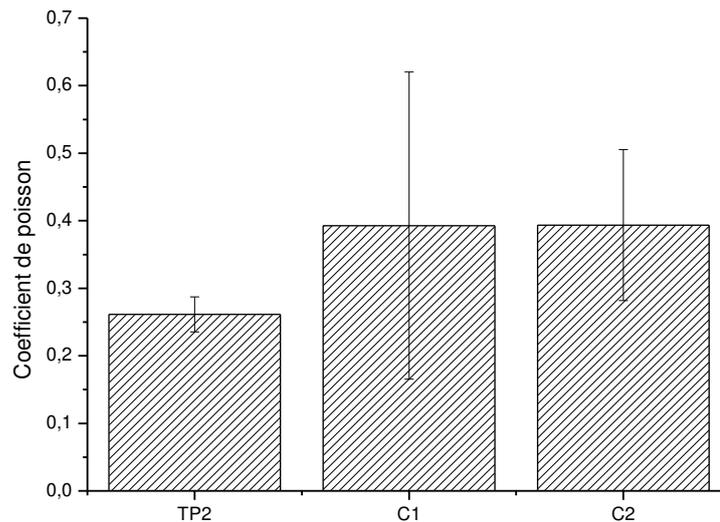


Figure III. 15: Coefficient de Poisson du matériau PSE et des composites PSE/Fibres de palmier dattiers.

Le tableau III.6 récapitule les propriétés mécaniques des matériaux PSE recyclé et les composite PSE/Fibres de palmier dattier.

Tableau III. 6: Récapitulation des propriétés mécaniques des matériaux PSE recyclé et les composite PSE/Fibres de palmier dattier.

C1	1	2	3	Valeur moyenne	Ecart type
E [Mpa]	1732,07	907,85	1626,37	1422,10	448,47
ν	0,478	0,565	0,135	0,392	0,228
σ_{tM} [Mpa]	9,50	4,37	10,90	8,26	3,43
C2	1	2	3	Valeur moyenne	Ecart type
E [Mpa]	1529,90	1457,05	1599,09	1528,68	71,03
ν	0,497	0,407	0,275	0,393	0,111
σ_{tM} [Mpa]	11,32	8,91	9,63	9,95	1,23

D'après les propriétés mécaniques de différents matériaux obtenus, on constate que le recyclage par thermo-pressage augmente la résistance à la traction du matériau, par contre rend le matériau plus ductile par rapport au recyclage par fusion. Le temps de maintien ou temps de fusion joue un rôle essentiel dans les propriétés mécaniques, ou il a été remarqué que l'augmentation du temps améliore ces propriétés. De plus, l'expérience a montré que le renforcement de la matière PSE recyclé par des fibres de palmier dattier donne des améliorations considérables.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail présente une étude expérimentale sur des matériaux obtenus par le recyclage des déchets industriels et végétaux. Les déchets industriels, en polystyrène expansé, sont recyclés pour obtenir un matériau pure PSE. Deux méthodes de recyclage sont utilisées pour l'élaboration du matériau, la fusion de la matière et le thermo-pressage.

Afin d'améliorer les propriétés mécaniques du matériau PSE recyclé, les déchets végétaux locaux de palmier dattier sont utilisés sous forme de fibres courtes comme renfort dans l'élaboration du matériau. Le composites PSE/Fibres de palmier dattier a été élaboré par le thermo-pressage des constituants. Deux proportions massiques entre le renfort et la matrice ont été considérés afin de déterminer l'effet de la quantité du renfort dans le composites sur les propriétés mécaniques du composite.

Pour la détermination des propriétés mécaniques des matériaux élaborés, tel que le module d'élasticité, la résistance à la traction et le coefficient de Poisson, des essais de traction ont été réalisés. Pour ans le matériau PSE recyclé par fusion, il a été constaté que l'augmentation de temps de fusion augmente les propriétés mécaniques matériau, ainsi la fusion à deux faces donne des résultats meilleurs que la fusion à une seule face. D'autres part, dans le matériau PSE recyclé par thermo-pressage, l'augmentation du temps de maintien rend le matériau plus ductile et améliore la résistance à la traction, une légère diminution dans le module d'élasticité a été remarquée. D'où la méthode de recyclage par fusion donne une amélioration dans le modulé d'élasticité, par cotre la méthode de thermo-pressage améliore la résistance à la traction du matériau PSE.

Le renforcement de PSE par des fibres de palmier dattier, par thermo-pressage, a amélioré les propriétés mécaniques du matériau PSE. Le matériau composite PSE/Fibres de palmier dattier à montré une rigidité et une résistance supérieurs au matériau PSE recyclé. Ces améliorations sont de 90% et de 45% dans le module d'élasticité et de la résistance à la traction, respectivement. Alors, les fibres de palmier dattier peuvent être utilisés dans la fabrication des bio-composites avec des nouvelles utilisations selon les propriétés mécaniques obtenues.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Chazara, P., *Outils d'élaboration de stratégie de recyclage basée sur la gestion des connaissances: application au domaine du génie des procédés*, 2015.
2. ASNOUNE, M., *Optimisation de la gestion des déchets ménagers dans quelques villes de l'Ouest algérien*, 2017.
3. Balet, J.-M., *Gestion des déchets-5e éd*2016: Dunod.
4. Moletta, R., *Le traitement des déchets*2009: Lavoisier.
5. Djemaci, B., *La gestion des déchets municipaux en Algérie*. Université de Rouen, France, Analyse et prospective et éléments d'efficacité. These de doctorat, 2012.
6. Balet, J.-M., *Gestion des déchets*2016: Dunod.
7. Damien, A., *Guide du traitement des déchets*. 5 ed2002, 2004, 2006, 2009: Dunod Paris.
8. http://www.stockphotos.lu/image.php?img_id=28025685&img_type=1 (2019/06/21).
9. Francou, C., *Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains: Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage-Recherche d'indicateurs pertinents*, 2003, INAPG (AgroParisTech).
10. *LES DÉCHETS PUTRESCIBLES*. Available from: <http://ecogreenvalorisation.com/dechets-putrescibles/>(2019).
11. Elmaleh, S., *La valorisation des déchets solides municipaux aux Etats-Unis (deuxieme these)*, 1973, Université de Nancy 1.
12. Daniel Dickey, I., *Réduire, Réemployer, Recycler et Valoriser les Déchets: Un Guide des 3RV pour les Premières Nations du Québec* in *Institut de développement durable des Premières Nations du Québec et du Labrador*2008, Mars
13. Balet, J.-M., *Aide-mémoire de gestion des déchets-3ème édition*2011: Hachette.
14. Traore, B., *Elaboration et caractérisation d'une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés): Amélioration de la résistance par des charges en argiles*, 2018, Université Bourgogne Franche-Comté; Université Félix Houphouët-Boigny
15. Coulibaly, M., *Modélisation micromécanique et caractérisation expérimentale du comportement des matériaux hétérogènes élastoviscoplastiques: application à la valorisation des polymères recyclés*, 2008, Université Paul Verlaine-Metz.
16. Kehila, Y., *Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie 2014*, 2016: AGENCE NATIONALE DES DECHETS.
17. Kehila, Y., F. Mezouari, and G. Matejka, *Impact de l'enfouissement des déchets solides urbains en Algérie: expertise de deux centres d'en-fouissement technique (CET) à Alger et Biskra*. 2009.
18. Mezouari-Sandjakdine, F., *Conception et exploitation des centres de stockage des déchets en Algérie et limitation des impacts environnementaux*, 2011, Limoges.
19. Kple, M., *Étude des voies de valorisation des déchets ménagers au Bénin: cas de la ville d'Abomey-Calavi*, 2015, Université de Lorraine.

Références bibliographiques

20. Perrin, N., *Approche globale des besoins en informations des collectivités locales dans le domaine de la gestion des déchets ménagers. Essai d'une analyse spatiale sur les villes de Grenoble, Vitry-Sur-Seine et de la Communauté d'Agglomération du Pays Voironnais*, 2004, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
21. Feghali, E., *Nouveaux procédés catalytiques pour le recyclage de déchets ligno-cellulosiques, de polymères et de dérivés du CO₂*, 2015, Université Paris Sud-Paris XI.
22. Al-Salem, S., P. Lettieri, and J. Baeyens, *Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review*. Waste management, 2009. **29**(10): p. 2625-2643.
23. Barthès, M.-L., *Régénération d'ABS et de PC Issus de DEEE sous Forme d'Alliages de Polymères Techniques ou de Nanocomposites*, 2010, Bordeaux 1.
24. Kallel, T.K., *Étude de mélanges PE/PS, contribution au recyclage*, 2003, Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
25. Ausset, S., *Procédé de recyclage de mélanges ABS-PC issus de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)*, 2013, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
26. Etienne. *Le recyclage des déchets plastiques : comment ça fonctionne ?*. 2019, Mai 01; Available from: <http://www.planete-durable.com/author/admin/>.
27. GONZLEZ, A. *Avantages et inconvénients du recyclage pour les professionnels Arts – culture* 2018, Juin 13 2019, Juin 07; Available from: <https://article.coachreferencement.fr/avantages-inconvenients-recyclage-professionnels/>.
28. Carrega, M., *Aide-mémoire-Matières plastiques-2ème édition* 2009: Dunod.
29. Koscher, M., *Étude de l'extrusion monovis de mélanges d'élastomères: approche expérimentale et simulation numérique*, 2003, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
30. Biron, M., *Aide-mémoire-Transformation des matières plastiques* 2010: Dunod.
31. Davidovic, A.S., *Matériaux biodégradables à base d'amidon expansé renforcé de fibres naturelles-Application à l'emballage alimentaire*, 2006, Université du Sud Toulon Var.
32. *Les techniques de transformation des plastiques*. 2015, FÉVRIER 12; Available from: <http://www.ryb-blog.fr/2015/02/12/les-techniques-de-transformation-des-plastiques/>.
33. Dessertenne, E., *Matériaux solide conducteur thermodurcissable: Application aux plaques bipolaires pour pile à combustible*, 2012, INSA de Lyon.
34. Bourban, P.-E., *Matériaux composites à matrice organique: constituants, procédés, propriétés*. Vol. 15. 2004: PPUR presses polytechniques.
35. Geneau-Sbartai, C., *Procédé d'élaboration d'agromatériau composite naturel par extrusion bivaissée et injection moulage de tourteau de tournesol*, 2006.
36. Soulama, S., *Caractérisation mécanique et thermique de biocomposites à matrice polystyrène recyclé renforcée par des coques de cotonnier (*Gossypium Hitsutum* L.) ou des particules de bois de Kénafe (*Hibiscus Cannabinus* L.)*, 2014, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
37. Tahar, M., *Contribution au développement des matériaux de construction à base des sous-produits du palmier dattier*, 2018, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
38. BOUSSEHEL, H., *ETUDE DES MOYENS DE STABILISATION DES COMPOSITES A BASE DE POLYSTYRENE*, 2018, Université Mohamed Khider-Biskra.

Références bibliographiques

39. mousa Almusawi, A., *Mise en œuvre et optimisation des propriétés d'une structure sandwich en matériaux biosourcés (fibres et bois de chanvre) avec une matrice en polystyrène expansé pour le bâtiment*, 2017, Bourgogne Franche-Comté.
40. Pujos, C., *Estimation de la rhéologie d'un polymère dans une filière d'extrusion Simulation d'écoulement avec transferts thermiques et Inversion de mesures*. L'université Bordeaux école doctorale de sciences physiques et de l'ingénieur, Thèse de Doctorat, 2006.
41. HAMRI, S., *Etude thermophysique de la diffusion de molécules de bas poids moléculaire dans des réseaux de polymères acryliques*, 2013.
42. Michaud, F., *Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique: aptitude au postformage*. 2003.
43. Reynaud, E., *Etude des relations Structure: Propriétés mécaniques de thermoplastiques renforcés par des particules inorganiques nanoscopiques*, 2000, Lyon, INSA.
44. Dupeux, M., *AIDE-MEMOIRE SCIENCE DES MATERIAUX*, © Dunod2004.
45. Mahiout, S., *Mettre en valeur ou bannir le polystyrène: approches dans un cadre de développement durable*, 2014, éditeur non identifié.
46. ISO, E., *527-2. Plastiques-Détermination des propriétés en traction-Partie*, 2012. **2**.
47. Krawczak, P., *Essais mécaniques des plastiques: Caractéristiques instantanées*, 1999.
48. ISO, E., *527-1.(1996). "Plastics—Determination of tensile properties—Part 1: General principles,"*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1996.
49. ALIMI, L., *COMPORTEMENT MECANIQUE ET RUPTURE DU HDPE SOUS ENVIRONNEMENTS CONTROLES* 2007, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA.
50. Pommier, S., *Mécanique des matériaux*. 2017.

Liste des abréviations

CSDU : Centre de stockage des déchets ultimes.

DIB : Déchets industriels banals.

DEB : Déchets banals d'entreprise.

DID : Déchets industriels dangereux.

DIND : Déchets industriels non dangereux.

DIS : Déchets industriels spéciaux.

DH : Déchets hospitaliers.

DAS : Déchets d'activités de soins.

DASRI : Déchets d'activités de soins à risque infectieux.

OM : Ordures ménagères.

DM : Déchets municipaux.

DMA : Déchets ménagères et assimilés.

CNC : Combustibles non classés.

INC : Incombustibles non classés.

PE : Polyéthylène.

PEHD : Polyéthylène haute densité.

PEBD : Polyéthylène basse densité.

PET : Polyéthylène Téréphtalate.

PP : Polypropylène.

PS : Polystyrène.

PSE : Polystyrène expansé.

PVC : Polychlorure de vinyle.

ABS : Acrylonitrile butadiène styrène.

EVA : Ethylène Vinyl Acétate.

VHU : Véhicules hors d'usage.

CET : Centre d'enfouissement technique.

3R-VE : Réduction des déchets à la source, réemploi, recyclage, valorisation et élimination.

IR : Radiation infrarouge.

CMO : Composites à matrice organiques.

CMC : Composites à matrice céramiques.

CMM : Composites à matrice métalliques.

σ traction : Résistance à la traction.

ρ : Densité.

Liste des abréviations

MOE : Module d'élasticité en flexion.

A : Allongement à la rupture.

Tc: Tenue à la chaleur continue.

F-1-1 : Recyclage par fusion sur une seule surface à 20 min.

F-1-2 : Recyclage par fusion sur une seule surface à 30 min.

F-2-1 : Recyclage par fusion sur deux surfaces à 20 min.

F-2-2 : Recyclage par fusion sur deux surfaces à 30 min.

TP1 : Recyclage par le thermo-pressage à 90 min.

TP2 : Recyclage par le thermo-pressage à 120 min.

C1 : Composite PSE/Fibres de palmier dattier (10%).

C2 : Composite PSE/Fibres de palmier dattier (15%).

ASTM : American society for testing materials.

F : Charge [*KN*].

N : Charge axiale [*KN*].

S : Section d'éprouvette [*m²*].

σ : Contrainte [*Gpa*].

σ_e : Limite élastique [*Gpa*].

Z% : Coefficient de striction

S₀ : Section initiale de l'éprouvette [*m²*].

S_u : Section ultime après rupture [*m²*].

ε : Déformation.

ε_T : Déformation transversale.

ε_L : Déformation longitudinale.

l₀: Longueur de référence [*mm*].

Δl : Allongement [*mm*].

ν : Coefficient de poisson.

E : Module d'élasticité longitudinal [*Gpa*].

Liste des abréviations