



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 :

GHOUTHY Djaber et ADISSA Ahmed Tayeb

Le : mercredi 12 juin 2024

Caractérisation mécanique d'un matériau composite à base des déchets industriels

Jury :

Pr.	BENCHABANE Adel	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	MASRI Tahar	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	DJELLAB Mounir	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2023 - 2024

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu qui nous a toujours aidé et nous a donné la patience et le courage au cours des années universitaires précédentes.

*Nous tenons particulièrement à remercier **Dr. Masri Tahar**, notre encadreur, qui a supervisé la production de ce travail, ou on exprimant nos profonds et sincères remerciements pour ses efforts, ses critiques constructives et sa confiance en nous pendant cette période de recherche difficile. Nous n'oublions pas **Dr. Yagoub Mohamed**, qui nous a également aidés dans ce travail. Vous avez tout notre respect et notre gratitude.*

*Enfin, nous remercions également notre **famille et nos amis**, car nous n'aurions pas pu réaliser ce travail sans vous. Nos sincères remerciements à tous.*

Dédicace

ADISSA AHMED TAYEB

Je dédie ce modeste travail à

Mon père, ADISSA Mohamed

Ma mère, A.NOURA

Mon frère, ADISSA Mohanned

Ma sœur, future médecin ADISSA SOUNDOUS

Ma famille, ADISSA

Et tous mes amis aussi

Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Dédicace

Ghouthi Jaber

*Je dédie ce travail à tous ceux que j'aime et apprécie
particulièrement :*

*À mon père **Ghouthi Sulaiman***

*Et à ma mère, **K.Djamila***

Qui m'ont toujours soutenu

Et à mes sœurs.

À mes frères.

*À ma famille **Ghouthi***

À tous mes chers amis

Et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

الملخص.

يمثل هذا العمل دراسة تجريبية على المواد المركبة المعتمدة على النفايات الصناعية. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو مدى جدوى استخدام مفهوم جديد للمصفوفة يسمى المصفوفة الهجينة في تطوير المواد المركبة. ميزة هذه المصفوفة هو تقليل كمية مصفوفة البوليستر في تطوير المواد مما يقلل من تكلفة الإنتاج. في تطوير المواد المركبة، تم استخدام النفايات الصناعية، مثل البوليسترين الممدد (EPS) في إنتاج المصفوفة، وتم استخدام النفايات الناتجة عن الإطارات البالية كتعزيز. لتطوير المواد المركبة، تم استخدام مصفوفات مختلفة، مثل مصفوفة EPS التي تم الحصول عليها عن طريق إعادة تدوير EPS مع البنزين، وراتنج البوليستر ومصفوفة هجينة مكونة من 50% من مصفوفة EPS المعاد تدويرها و50% راتنجات البوليستر. أجريت دراسة مقارنة بين المواد المركبة الثلاثة بالاعتماد على المصفوفات الثلاثة. من أجل دراسة تأثير حجم التسليح على السلوك الميكانيكي للمادة، تم أخذ ثلاثة أحجام لجزيئات المطاط (2-3 مم، 3-4 مم، 4-5 مم). تم إجراء اختبارات الضغط على اختبارات موحدة لتحديد قوة الضغط ومعامل يونغ للمواد المركبة المطورة. بشكل عام، أظهرت الدراسة المقارنة أن استخدام المصفوفة الهجينة يحسن صلابة المادة (المادة الهشة) مقارنة بالمواد المركبة المعتمدة على مصفوفة EPS أو راتنجات البوليستر، ومن ناحية أخرى يقلل من مقاومة ضغط المواد. بالإضافة إلى ذلك، أظهرت دراسة تأثير حجم التسليح على السلوك الميكانيكي للمواد المركبة بالاعتماد على المصفوفة الهجينة أن زيادة حجم التسليح يحسن صلابة وقوة المواد المركبة. يمكن تحسين النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة باستخدام مقترحات أخرى بين العناصر التي تشكل المصفوفة وكذلك استخدام الراتنجات الأخرى.

Abstract.

This work represents an experimental study on composite materials based on industrial waste. The main objective of this study is the feasibility of using a new concept of a matrix, called Hybrid Matrix, in the development of composite materials. The advantage of this concept is the reduction in the quantity of the polyester matrix in the development of materials which reduces the cost of production. In the development of composite materials, industrial waste, such as expanded polystyrene (EPS) was used in the production of the matrix, and waste from worn tires was used as reinforcement. For the development of composite materials, different matrices were used, such as the EPS matrix obtained by recycling EPS with gasoline, a polyester resin and a hybrid matrix composed of 50% of the recycled EPS matrix and 50% polyester resin. A comparative study between the three composite materials based on the three matrices was carried out. In order to study the effect of the reinforcement size on the mechanical behavior of the material, three rubber particle sizes (2-3mm, 3-4mm and 4-5mm) were considered. Compression tests were carried out on standardized tests in order to determine the compressive strength and Young's modulus of the composite materials developed. Generally, the comparative study showed that the use of the hybrid matrix improves the rigidity of the material (fragile material) compared to composite materials based on an EPS matrix or a polyester resin, on the other hand reduces the resistance to compression of materials. In addition, the study of the effect of the size of the reinforcement on the mechanical behavior of composite materials based on the hybrid matrix showed that increasing the size of the reinforcement improves the rigidity and strength of the composite materials. The results obtained in this study can be improved using other proposals between the elements constituting the matrix as well as using other resins.

Résumé.

Ce travail représente une étude expérimentale sur des matériaux composites à base des déchets industriels. L'objectif principale de cette étude est la faisabilité de l'usage d'un nouveau concept d'une matrice, appelé Matrice hybride, dans l'élaboration des matériaux composites. L'avantage de ce concept est la réduction de la quantité de la matrice polyester dans l'élaboration des matériaux qui réduit le coût de la production. Dans l'élaboration des matériaux composites, les déchets industriels, tel que le polystyrène expansé (EPS) a été valorisé dans la production de la matrice, et les déchets des pneus usés ont été utilisé comme un renfort. Pour l'élaboration des matériaux composites, différentes matrices ont été utilisé, tel que la matrice EPS obtenus par le recyclage de EPS avec l'essence, une résine de polyester et une matrice hybride composé de 50% de la matrice EPS recyclé et 50% de la résine polyester. Une étude comparative entre les trois matériaux composites à bases des trois matrices a été effectuée. Afin d'étudié l'effet de la taille de renfort sur le comportement mécanique du matériau, trois granulométrie en particule de caoutchouc (2-3mm, 3-4mm et 4-5mm) ont été considérés. Des essais de compression ont été réalisés sur des épreuves normalisés afin de déterminer la résistance à la compression et le module de Young des matériaux composites élaborés. Généralement, l'étude comparative a montré que l'usage de la matrice hybride améliore la rigidité du matériau (Matériau fragile) par rapport au matériaux composites à base d'une matrice EPS ou d'une résine polyester par contre réduit la résistance à la compression des matériaux. De plus, l'étude de l'effet de la taille du renfort sur le comportement mécanique des matériaux composite à base de la matrice hybride a montrée que l'augmentation de la taille du renfort améliore la rigidité et la résistance des matériaux composites. Les résultats obtenus dans cette études peuvent être amélioré ont utilisant d'autre propositions entre les éléments de constituant la matrice ainsi d'utilisé d'autre résine.

Sommaire

1	Généralités sur les matériaux composites	4
1.1	Matériaux composites	4
1.1.1	Définition.....	4
1.2	Éléments Constituants d'un Matériau Composite	4
1.2.1	Les Matrices.....	5
a)	Les matrices thermodurcissables	5
b)	Les matrices thermoplastiques	6
c)	Les matrices élastomères	6
d)	Les matrices métalliques	7
1.2.2	Le renfort.....	7
1.3	Classification des matériaux composites	7
1.3.1	Classification suivant la forme des constituants	8
a)	Composites à renfort en fibres.....	9
•	Fibres coupées.....	9
•	Fibres longues.....	9
b)	Les composite à renfort de forme particules	10
1.3.2	Classification suivant la nature des constituants	10
a)	Composites à matrice organique	10
b)	Composites à matrice métallique.....	10
c)	Composites à matrice minérale.....	10
1.4	Conclusion	11
2	Les déchets naturels et industriels	13
2.1	Définition de déchet	13
2.2	Classification des déchets	13
2.2.1	Par leur nature.....	14
a)	Les déchets inertes.....	14
b)	Les déchets organiques	14
c)	Les déchets banals.....	14
d)	Déchets dangereux (déchets spéciaux).....	14
e)	Déchets ultimes	15
2.2.2	Par leurs origines	15
a)	Les déchets industriels	15
b)	Les déchets industriels inertes	15

c) Déchets hospitaliers (DH), Déchets d'activités de soins (DAS) ou déchets infectieux.....	15
d) Déchets d'activités de soins à risque infectieux (DASRI)	16
e) Les déchets radioactifs	16
f) Les déchets agricoles.....	16
g) Les déchets ménagers et assimilés.....	17
2.3 La gestion des déchets ménagers.....	17
2.3.1 La collecte des déchets	17
a) Définition.....	17
b) La collecte indifférenciée	18
c) La collecte sélective.....	18
2.3.2 Le tri des déchets.....	18
a) Le traitement.....	18
2.3.3 L'élimination des déchets	19
2.3.4 L'enfouissement technique.....	19
2.4 Composition physique des déchets ménagers.....	19
2.4.1 Matières organiques.....	20
a) Papier et carton.....	20
b) Plastique.....	20
c) Verre.....	21
d) Métal	21
e) Aluminium	21
f) Acier.....	22
2.5 Conclusion	23
3 Matériaux et méthodes expérimentales.....	25
3.1 Elaboration des matériaux composites	25
3.1.1 Préparation de la matrice	25
a) Matrice EPS recyclé.....	25
b) Résine en Polyester	25
c) Matrice hybride.....	26
3.1.2 Préparation du renfort.....	26
3.1.3 Préparation d'éprouvettes.....	27
3.2 Caractérisation expérimentale des matériaux composites	28
4 Caractérisation mécanique des matériaux composites : Résultats et discussions	31
4.1 Effet des propriétés mécaniques de la matrice sur le comportement du matériau composite.....	31

4.1.1	Matériau composite EPS/PCP.....	31
4.1.2	Matériau composite Polyester/PCP.....	32
4.1.3	Matériau composite EPS+RP/PCP.....	33
4.1.4	Etude comparative entre les composites EPS/PCP, Polyester/PCP et B/PCP	33
a)	Comportement mécanique des matériaux composites.....	33
b)	Module d'élasticité.....	34
c)	Contrainte maximal à la compression	35
4.2	Effet de la taille du renfort sur les propriétés mécaniques des matériaux composites..	36
4.2.1	Comportement mécaniques des matériaux composites.....	36
4.2.2	Module d'élasticité	37
4.2.3	Résistance à la compression	38
5	Conclusion générale.....	41
	Références bibliographiques.....	116

Listes des figures

Figure 1. 1 : Matériaux composites. [12]	4
Figure 1. 2 : Les différentes matrices des matériaux composites.	5
Figure 1. 3 : Matériaux composites.	8
Figure 1. 4 : fibres coupées.	9
Figure 1. 5: Fibres longues	9
Figure 1. 6 : Matériau composite à renfort de forme particule.	10
Figure 2. 1: La composition moyenne des déchets ménagers par continent	20
Figure 3. 1: Recyclage du polystyrène par l'essence (Matrice EPS)	25
Figure 3. 2: a) Particule de caoutchouc de pneus, b) Tamiseuse Retsch AS200	26
Figure 3. 3: Eprouvette de compression	27
Figure 3. 4: Eprouvette en compression non déformé et déformé	29

Liste des tableaux

Tableau 2. 1 : Durée de décomposition de certains types de déchets industriels	22
Tableau 2. 2 : Économies de ressource par le recyclage de différents matériaux	22
Tableau 3. 1 : Les différents cas des matériaux composites étudiés	28

Introduction générale

Introduction générale

Les dernières décennies ont vu une augmentation considérable de l'utilisation des matériaux composites dans pratiquement tous les domaines notamment dans les constructions en génie civil [1]. La fabrication de structures composites ainsi que les constituants du composite lui-même doit répondre aux exigences imposées par beaucoup de défis notamment de nature environnementale [2-4]. Actuellement, l'une des solutions alternatives proposées par la recherche est le recours aux ressources naturelles et industriels comme constituant dans les matériaux composites [4]. L'utilisation des ressources naturelles et industriels dans la formulation des matériaux composites n'est pas un concept nouveau [5]. Aujourd'hui, le choix des ressources, naturelles ou industriels, est inévitable et cela est principalement dû au faible coût, au caractère renouvelable, à la bonne biodégradabilité et aux propriétés thermiques et mécaniques importantes ajoutées au produit final [6].

L'une des ressources renouvelables les plus sollicitées dans la formulation d'élaboration de matériaux composites, de nos jours, provient de sources végétales [4], obtenue à partir des déchets solides générés par l'activité de production agricole et industrielle [7]. De plus, les sources industriels sont aussi une grande importance dans la production des matériaux composites à faible coût. En effet, les dernières années ont vu une augmentation spectaculaire de l'utilisation des déchets agricoles, tel que les fibres de déchets de palmier dattier, chanvre, jute, et déchet industriels, tel que déchets en plastique, déchets d'emballages, pour fabriquer des nouveaux types de composites respectueux à l'environnement [4, 8, 9].

Le recyclage des déchets naturels et industriels pour produire d'autres matériaux composites apparaît comme une alternative environnementale et économique. En effet, le développement de matériaux composites renforcés à partir de ce type de déchets peut être une excellente solution d'un point de vue environnemental [10].

Dans ces contextes, environnemental, économique et innovation, le présent travail a comme objectif la mise en œuvre et la caractérisation de nouveaux matériaux composites destinés à la construction en génie civil et en mécanique. Les matériaux développés sont à base de déchets industriels (déchets de polystyrène expansé EPS et déchets de caoutchouc des pneus usés).

Le présent travail est organisé en quatre chapitres comme suit :

Le premier et le deuxième chapitre représentent des recherches bibliographiques sur les matériaux composites et les déchets naturels et industriels, respectivement.

Le troisième chapitre décrit la partie matériaux et méthodes expérimentales du présent travail. D'abord, une partie décrivant les types de renforts et de matrices utilisés est présentée en montrant les détails de la mise en œuvre des composites, des méthodes et des conditions de préparations des échantillons. Trois différents matériaux composites à base de trois différentes matrices et trois différentes granulométries ont été élaborés. Le premier matériau composite est à base d'une matrice obtenue par le recyclage de déchets EPS. Dans le deuxième matériau composite une résine de polyester a été utilisée comme matrice. Le troisième matériau composite une matrice hybride, composée de 50% d'EPS recyclé et 50% de la résine polyester, a été utilisée.

Ensuite, une description de l'essai de caractérisations effectuée pour chaque matériau composite a été présentée. Les trois différents matériaux composites ont été caractérisés par l'essai de compression afin de déterminer le module de Young et la résistance à la compression.

Le dernier chapitre est consacré à la partie résultats et discussion de la caractérisation expérimentale des composites élaborés. Dans la première partie, une étude comparative entre les trois matériaux composite de trois différentes matrices a été effectuée. Suivi d'une étude basée sur l'effet de la taille du renfort sur le comportement mécanique des matériaux composite en utilisant seulement la matrice Hybride.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale synthétisant les résultats obtenus en proposant des perspectives relatives à l'étude réalisée.

Chapitre I
Généralités sur les matériaux
composites

1 Généralités sur les matériaux composites

1.1 Matériaux composites

1.1.1 Définition

Un matériau composite est composé de différentes phases appelées renforts et matrice (Figure 1.1). Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts peuvent être sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est de garantir la résistance mécanique face aux efforts. La matrice assure la cohésion entre les renforts afin de répartir les sollicitations mécaniques. L'orientation et l'agencement des fibres permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. Nous nous intéressons particulièrement aux composites à renfort en fibre longue continue utilisés dans divers secteurs comme le naval, l'automobile, l'aéronautique et le spatial. Les pièces structurales sont fabriquées en empilant des couches en optimisant les orientations des renforts en fonction des charges qu'elles doivent supporter. Le choix de la résine ou du renfort dépend de l'application finale visée [11].

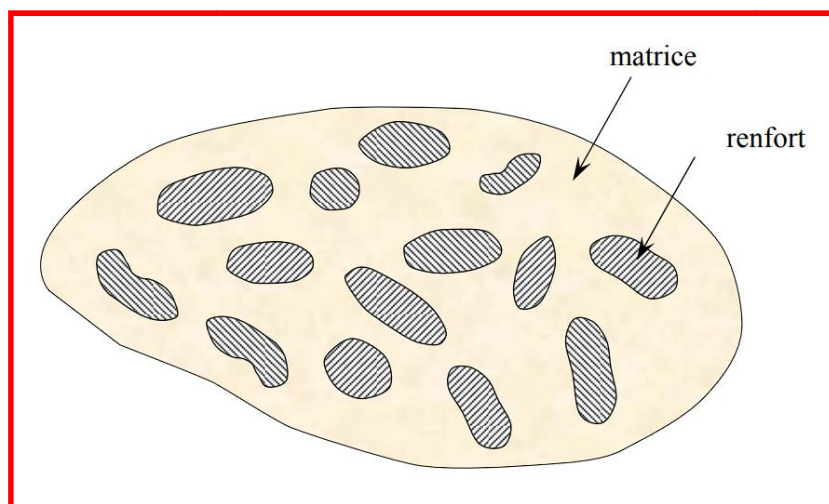


Figure 1. 1 : Matériaux composites. [12]

1.2 Éléments Constituants d'un Matériau Composite

Un matériau composite est composé d'une matrice et d'un renfort, formé de fibres ou de particules. Les matrices sont des résines ou des liants (polyester, époxyde, etc.). Le renfort et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de la résine tout en réduisant le coût de production. Du point de vue mécanique, l'ensemble résine-charges se comporte comme un matériau homogène, et le composite est considéré comme formé d'une matrice et d'un renfort. Le renfort

apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, tandis que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de les protéger contre les agressions extérieures. Un matériau composite est constitué principalement d'une matrice (résine) et d'un renfort (fibres, particules).

1.2.1 Les Matrices

Les matrices sont essentielles pour la composition des pièces composites.

- ✓ Elles conservent la répartition géométrique des fibres.
- ✓ Elles confèrent aux composites leurs propriétés chimiques et thermiques.
- ✓ Ils déplacent les forces mécaniques.

Il y a divers types de matrices que nous pouvons ranger dans différentes catégories (Figure 1.2). Suivantes :

- Les matrices thermodurcissables.
- Les matrices thermoplastiques.
- Les matrices élastomères
- Les matrices métalliques[13].

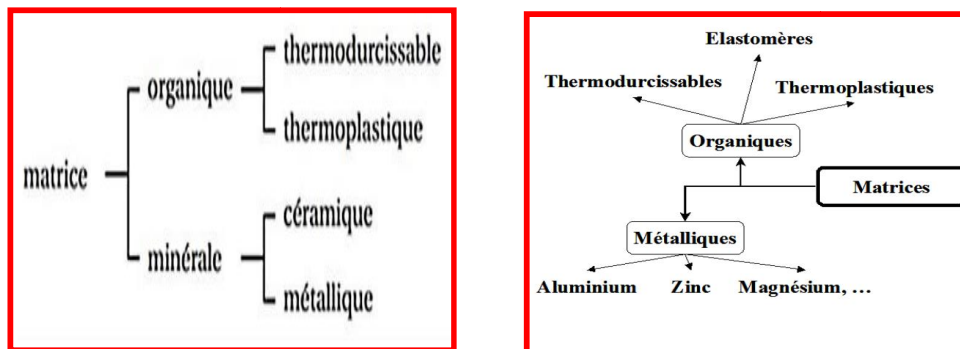


Figure 1. 2 : Les différentes matrices des matériaux composites.

a) Les matrices thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont les plus souvent employées dans la production de pièces en matériaux composites. Elles sont classées en différentes familles, chacune ayant une composition chimique spécifique. Parmi ces catégories, on distingue principalement :

- Les matrices polyesters (usage courant),

- Les matrices époxydes (tenue mécanique et chimique),
- Les matrices vinylesters (tenue chimique),
- Les matrices phénoliques (résistance au feu),
- Les matrices polyuréthanes (densité et dureté variables),
- Les matrices polyimides (tenue température > 260°C),
- Les matrices silicones[13].

b) Les matrices thermoplastiques

L'utilisation des matrices thermoplastiques est de plus en plus répandue dans la production de matériaux composites. Ces matrices sont favorisant une économie et moins nuisibles à l'environnement pendant leur fabrication, elles présentent une bonne capacité à résister aux chocs et permettent des vitesses de production élevées grâce à des cycles relativement courts. Les matériaux thermoplastiques sont généralement plus simples à recycler que les matériaux thermodurcissables, bien que leurs propriétés soient souvent moins élevées, sauf pour quelques polymères très techniques et donc plus coûteux, tels que le polyoxyméthylène (POM) ou les polyaryléthercétones (PEAK)[13].

- Les principales matrices couramment utilisées dans la production de pièces en composites thermoplastiques sont :
- Les polyamides ont généralement de bonnes propriétés mécaniques.
- Les polyester saturés sont caractérisés par leur rigidité élevée, leurs bonnes propriétés diélectriques et leur dureté élevée.
- Les polyoléfinés (très résistantes aux solvants, dotées d'une grande robustesse mécanique),
- Les polycarbonates (offrant une bonne transparence et une bonne résistance aux chocs)
- Les poly acétals (qui ont une bonne résistance et de bonnes propriétés électriques)[13].

c) Les matrices élastomères

Constitués de longues chaînes repliées sur elles-mêmes au repos, ces structures sont constituées de longues chaînes repliées sur elles-mêmes au repos. Des chaînes se déplacent les unes par rapport aux autres sous l'effet d'une contrainte. En général, ces chaînes sont vulcanisées, et la silicone, le caoutchouc ou encore l'EPDM (éthylène-propylène-diène monomère) sont parmi les élastomères les plus connus.

d) Les matrices métalliques

Les composites à matrice métallique ont été développés afin d'améliorer certaines caractéristiques des métaux tout en remédiant à certains inconvénients des composites à matrice organique (limitation de la température d'utilisation, vieillissement). Le renforcement des métaux et de leurs alliages par des fibres permet d'améliorer la rigidité, la résistance mécanique et la résistance à la fatigue à température ambiante (pour les métaux tendres comme le plomb) ainsi qu'à température élevée (aluminium, titane). Les composites à matrice métallique actuellement étudiés ou utilisés en quantités très limitées sont ceux à base d'aluminium, de magnésium ou de titane, renforcés par des fibres longues de carbone, de carbure de silicium, d'alumine ou de bore, des fibres coupées ou des whiskers de carbure de silicium. Ces matériaux présentent des caractéristiques mécaniques élevées et les conservent jusqu'à des températures importantes (400 °C pour l'aluminium). Ils ont une excellente résistance à l'environnement, sont insensibles aux rayons ultraviolets, offrent une bonne stabilité dimensionnelle, ainsi qu'une bonne conductivité électrique et thermique[13].

1.2.2 Le renfort

Le renfort constitue un squelette, une ossature, sur laquelle va s'exercer des contraintes mécaniques. Son rôle est d'améliorer la solidité du matériau composite. Les renforts peuvent présenter des structures très différentes selon les applications.

« Particules » dispersées dans matrice : par exemple le béton, cela concerne l'ajout de cailloux durs à une matrice cimentaire. Il y a aussi la possibilité d'utiliser des nanoparticules, où ils sont inclus par exemple dans une matrice polymère. Globalement, les charges renforçantes apportent un gain de solidité au matériau, de manière isotrope (sans direction privilégiée). Ils permettent également de limiter la propagation de fissures dans le matériau.

1.3 Classification des matériaux composites

La classification des matériaux composites est basée sur la structure et les composants de ces matériaux. En fonction de la structure des composants, les composites sont divisés en deux catégories : composites à fibres, qui sont des matériaux renforcés par des fibres (longues, courtes ou coupées). L'alignement et la disposition de ces fibres permettent de représenter les caractéristiques mécaniques de ce matériau composite, qui peuvent être ajustées et adaptées en fonction des variations dans la composition des constituants. la proposition des constituants et l'orientation des

fibres. Composites à particules : Un matériau composite à renfort de particules est un composite chargé de particules ne possédant ni dimensions ni formes bien précises. L'utilisation de ce type de matériau est limitée, les particules sont utilisées pour réduire le coût du matériau, tout en conservant leurs propriétés mécaniques (Figure 1.3) [12].

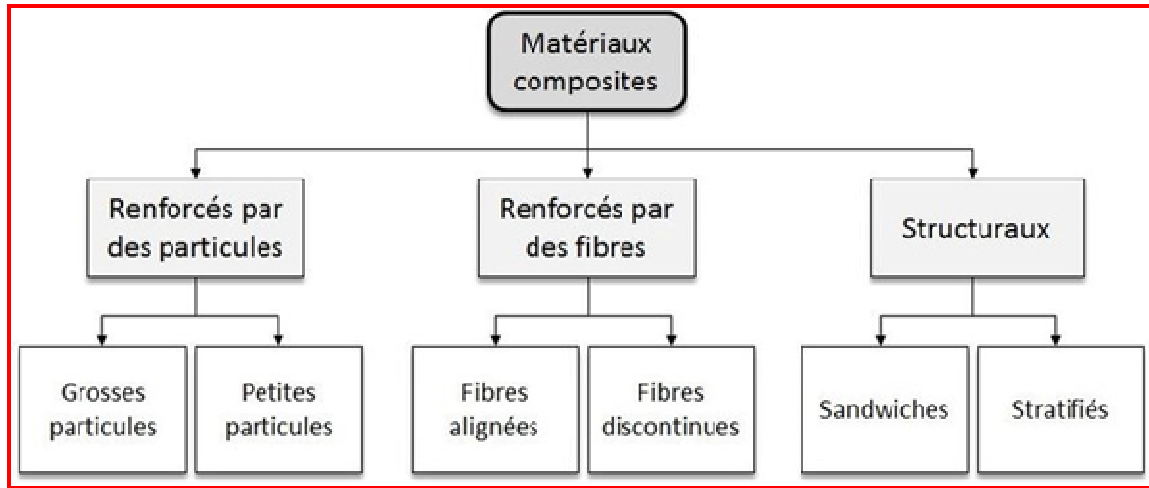


Figure 1. 3 : Matériaux composites.

1.3.1 Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres[12].

Les composites à particules sont des matériaux composés dans lesquels le renfort se présente sous forme de particules. Contrairement aux fibres, les particules n'ont pas de dimension privilégiée. Elles sont souvent utilisées pour améliorer différentes propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la résistance à la chaleur, la résistance à l'abrasion, etc. Le choix du type de particules dépend des caractéristiques souhaitées. Par exemple, l'ajout de plomb dans des alliages de cuivre facilite leur usinage. Les cermets, qui sont des composites métal-céramique à base de particules, sont adaptés aux applications à haute température. En outre, l'incorporation de particules d'élastomère dans des matrices polymères fragiles peut améliorer leur résistance à la rupture et aux chocs. Bien que le domaine des composites à particules soit en constante évolution, il ne sera pas abordé dans cet ouvrage en raison de sa diversité.

a) Composites à renfort en fibres

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes[14].

- **Fibres coupées**

Les fibres coupées sont des morceaux courts de matériaux fibreux généralement utilisés dans des applications industrielles, textiles ou composites (Figure 1.4).



Figure 1. 4 : fibres coupées.

- **Fibres longues**

Sont des fibres, naturelle ou synthétique, utilisés dans les fabrications des matériaux composites multicouches. Les fibres longues peuvent être disposées de différents angles pour avoir des propriétés différents selon les besoins.



Figure 1. 5: Fibres longues.

b) Les composite à renfort de forme particules

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux tels que la dureté, la conductivité électrique...etc. Dans les composites à renfort de forme particule (figure 1.6), il existe des zones de liaisons appelées interfaces. Des additifs, en particulier des produits chimiques, rentrent dans la composition du composite pour former des interphases...etc. Un matériau composite est la plupart du temps hétérogène et anisotrope.

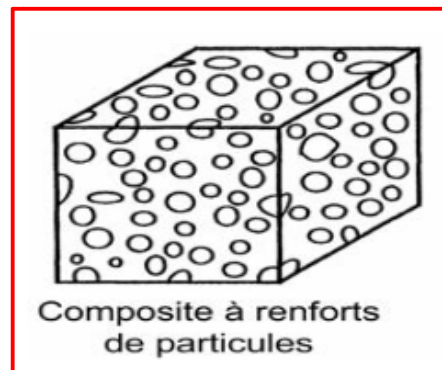


Figure 1. 6 : Matériau composite à renfort de forme particule.

1.3.2 Classification suivant la nature des constituants

En fonction de la composition de la matrice, les matériaux composites sont divisés en composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Différent types de renforts sont associés à ces matrices[15].

a) Composites à matrice organique

- Des fibres minérales : Verre, carbone, etc.... ;
- Des fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.... ;
- Des fibres métalliques :Bore, aluminium, etc....; [15]

b) Composites à matrice métallique

- Des fibres minérales : Carbone, carbure de silicium ;
- Des fibres métallo-minérales : Fibres de bore revêtues de carbure de silicium[15].

c) Composites à matrice minérale

- Des particules métalliques : Cermets ;

- Des particules minérales : Carburent, nitrures, etc.[15]

1.4 Conclusion

Les matériaux composites sont des matériaux qui sont composés de différentes phases, appelées renforts et matrice, qui sont liées de manière à empêcher tout glissement ou séparation entre elles lorsque le matériau n'est pas endommagé. Les renforts, sous forme de fibres continues ou discontinues, fournissent la résistance mécanique, tandis que la matrice assure la cohésion entre les renforts et la répartition des contraintes mécaniques.

Ces mélanges sont largement employés dans différents domaines tels que la marine, l'automobile, l'aéronautique et l'espace, où les composants structurels sont construits en superposant des couches tout en maximisant l'orientation des renforts en fonction des contraintes qu'ils doivent supporter. Il existe deux catégories principales de matériaux composites : ceux à base de fibres et ceux à base de particules. Les premiers sont renforcés par des fibres, tandis que les seconds contiennent des particules sans dimensions ou formes bien définies. Les matériaux composites à fibres peuvent être catégorisés en fonction de la forme des éléments constitutifs et du type de matrice. Les éléments constitutifs peuvent être sous forme de fibres continues ou discontinues, alors que la matrice peut être organique, métallique ou minérale.

Les matrices des composites, qu'elles soient de type thermodurcissable, thermoplastique, métallique ou biodégradable, sont cruciales dans la fabrication des pièces composites. Elles maintiennent la répartition géométrique des fibres, donnent aux composites leurs propriétés chimiques et thermiques, et supportent les forces mécaniques. Les matériaux thermodurcissables, comme les polyesters et les époxydes, sont couramment utilisés pour fabriquer des pièces composites en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques. Les résines thermoplastiques, de plus en plus populaires, offrent des avantages tels qu'une économie et une fabrication plus respectueuse de l'environnement. De plus, les composites à matrice métallique, renforcés par des fibres comme le carbone ou le carbure de silicium, affichent des caractéristiques mécaniques de haut niveau et préservent leurs propriétés même à des températures élevées, tout en offrant une bonne résistance à l'environnement.

Les matériaux composites sont essentiels dans divers secteurs industriels en raison de leurs propriétés mécaniques supérieures, de leur poids léger et de leur capacité à être personnalisés en fonction de la composition.

Chapitre II

Les déchets naturels et industriels

2 Les déchets naturels et industriels

2.1 Définition de déchet

La principale définition d'un déchet est un objet qui n'a pas ou plus d'utilité et dont le propriétaire veut se débarrasser. Par conséquent, un déchet peut prendre différentes formes. Selon la loi cadre du 15 juillet 1975, les déchets sont : Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer. Ensuite, il est possible de distinguer les déchets de matières organiques naturelles, comme le bois, les résidus végétaux et les déchets manufacturés avec d'autres composants naturels ou non. Ces déchets peuvent avoir une composition plus ou moins complexe en fonction de leur utilité d'origine et des propriétés attendues. Dans ce dernier cas, leur récupération devient plus compliquée. Ce type de déchet peut ne pas présenter de dangers ou de risques en soi. Néanmoins, comme le souligne bien que certains déchets ne représentent pas en soit de problèmes, une mauvaise gestion peut entraîner de graves accidents (incendie ...). Un déchet peut être aussi un objet qui continue à fonctionner sous sa fonction première, ou encore en mode dégradé. Pour ce type de déchet, une des principales activités de leur traitement consiste dans leur collecte. Un déchet peut enfin être un résidu d'exploitation ou de fabrication qui n'a pas été valorisé [16].

2.2 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.

Le décret n° 06-104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets industriels, y compris les déchets spéciaux dangereux dans son Article (2) constituée par des listes en annexe et une classification systémique (Voir annexe).

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[17] :

2.2.1 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 atteintes à l'environnement ou à la santé humaine. Il s'agit presque exclusivement de déchets minéraux, issus essentiellement du secteur du BTP. Mais attention : tous les minéraux ne sont pas inertes ! À noter aussi qu'un déchet non dangereux n'est pas nécessairement inerte[18].

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[19].

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[19].

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[18].

Ces déchets comme (restes de peinture et de colles, 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[20].

2. Les déchets naturels et industriels

e) Déchets ultimes

Comme nous l'avons déjà évoqué, 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)[19].

2.2.2 Par leurs origines

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 divers (déchets de fabrication, emballages vides, sous-produits de production, rebuts, produits, obsolètes, résidus de nettoyage solides ou liquides...) [19], et ils représentant environ 160 millions de tonnes par an.

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) [21] : 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 [19].

b) 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[19].

c) Déchets hospitaliers (DH), Déchets d'activités de soins (DAS) ou 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

2. Les déchets naturels et industriels

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[21].

d) 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 [22].

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

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 [21].

f) 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[22].

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 de réutiliser une bonne partie lui-même (épandages des fumiers par exemple) [21].

2. Les déchets naturels et industriels

g) Les déchets ménagers et assimilés

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... [23].

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. Les déchets municipaux (DM) ou urbains, les résidus urbains (déchets du nettoyage), les déchets occasionnels (déchets encombrants et autres....) qui ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés en raison de leur caractère volumineux [24]. Nous pouvons citer ici, les meubles, les pneus, l'électroménager...[23].

2.3 La gestion des déchets ménagers

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 [17]:

2.3.1 La collecte des déchets

La loi algérienne n° 19-01, fixant les conditions de nettoyage, d'enlèvement et du traitement des déchets solides, indique que : « l'assemblée populaire communale organise, sur son territoire, soit directement, soit en association par l'intermédiaire d'organismes intercommunaux et /ou appropriés, un service de collecte et d'élimination des déchets solides urbains, à l'exclusion de certains déchets » [17].

a) Définition

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 activité comprend donc le ramassage des déchets, leur transport jusqu'au lieu de stockage provisoire dans un centre de transit ou jusqu'à leur lieu de traitement. Il existe de

2. Les déchets naturels et industriels

nombreuses contraintes pour la collecte des déchets ménagers en milieu rural : densité de population très hétérogène (entre les petites villes, l'habitat isolé et les communes urbaines).

b) La collecte indifférenciée

Également nommée collecte traditionnelle ou résiduelle, s'effectue sans distinction de nature des déchets.

c) La collecte sélective

Ou 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 [25].

2.3.2 Le tri des déchets

Le tri des déchets est la séparation des déchets selon leur nature en vue de leur traitement, par exemple le papier, plastique, caoutchouc, ciment, verre, bois, déchets naturels, ... [20].

a) Le traitement

La nouvelle notion à appliquer dans la gestion des déchets est basée sur le principe connu sous l'appellation des 3R-VE avec par ordre de priorité :

- **La Réduction à la source** : réduction de la quantité de déchets ou élimination des déchets à l'endroit même où ils sont générés. 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 [17].
- **Le Réemploi ou récupération** : se fait par sortir un déchet de son circuit traditionnel de collecte et de traitement et de le réutiliser dans une autre application qu'il avait initialement [21].
- **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 [25].

2. Les déchets naturels et industriels

2.3.3 L'élimination des déchets

Comprend les opérations de traitement thermique, physico-chimique et biologique, de mise en décharge, d'enfouissement, d'immersion et de stockage des déchets, ainsi que toutes les autres opérations ne débouchant pas sur une possibilité de valorisation ou autre utilisation du déchet. 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'usage...). Les déchets issus de l'incinération (cendres, mâchefer) sont ensuite éliminés en centre d'enfouissement technique.

2.3.4 L'enfouissement technique

Les déchets spéciaux ultimes sont ceux qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de leur caractère dangereux et polluant. Les déchets admis en centre d'enfouissement technique (CET) sont des déchets essentiellement solides, minéraux avec un potentiel polluant constitué de métaux lourds peu mobilisables. Ils sont très peu réactifs, très peu évolutifs, et très peu solubles[20].

2.4 Composition physique des déchets ménagers

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 mondial en proposant 12 catégories de constituants : fractions fermentescibles, papiers, cartons, textiles, textiles sanitaires, plastiques, verres, métaux, inertes, complexes. La composition des déchets dépend de plusieurs facteurs : climat, saison, type de région, niveau de vie, situation géographique, niveau socioculturel, tri à la source.

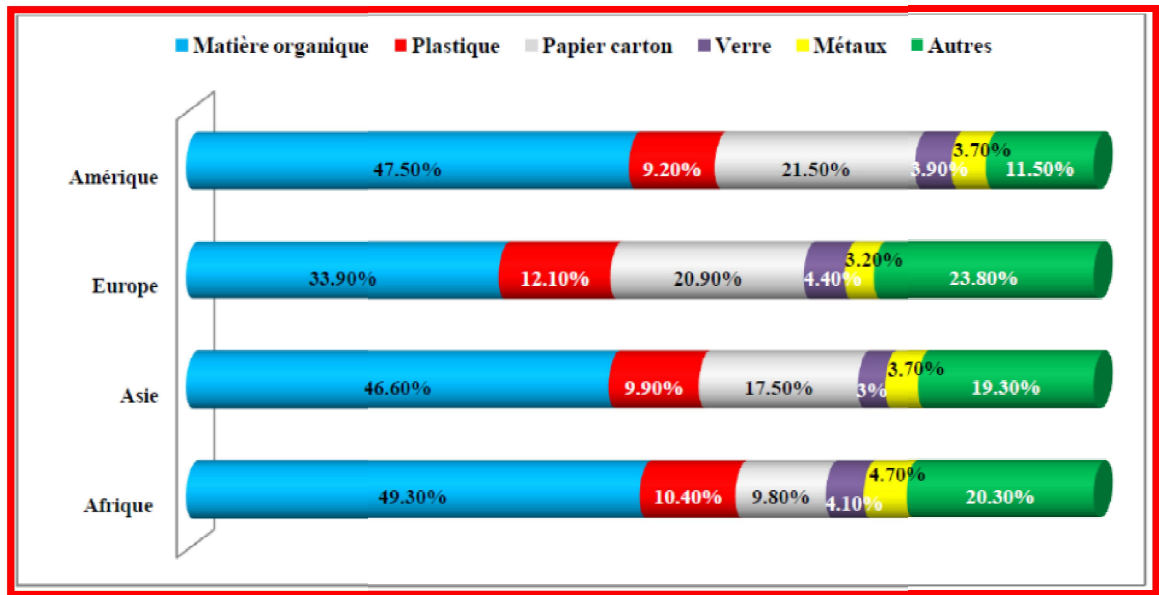


Figure 2. 1: La composition moyenne des déchets ménagers par continent.

2.4.1 Matières organiques

Les restes de la table, trognons de pommes, pelures de fruits et autres épluchures de patates présente près de 40% de déchets de nourritures. Ces matières prennent le chemin du dépotoir ou de l'incinérateur où ils occupent beaucoup de place tout en dégageant mauvaises odeurs et méthane en se décomposant (méthane). Ces matières composables sont des matières organiques et biodégradables. Ces déchets se dégradent par le processus de compostage qui est un processus biologique naturel où la matière vivante boucle son cycle en retournant à la terre. Le compostage est une solution facile, efficace et demandant peu d'investissement pour réduire la quantité de déchets.

a) Papier et carton

Les déchets de papier et carton sont issus des journaux, de boissons diverses, emballage en carton de marché, de la fourniture scolaire et administrative (cahier, papier, etc. ...)[20].

b) Plastique

La base des plastiques, c'est le pétrole ou le gaz naturel, des ressources non renouvelables et polluantes. Le plastique n'est donc pas une matière organique qui se décompose, hormis les produits minces et peu résistants, tels que les sacs de plastiques. Ils nécessitent de 200 à 450 ans

2. Les déchets naturels et industriels

avant de se décomposer. Il existe de nombreux types de plastique qui sont, pour la plupart, facilement recyclables. En plus de préserver le pétrole (700 kg de pétrole brut pour 1 tonne de plastique recyclé). Le recyclage des plastiques permet des gains d'énergie appréciables (57 à 75%), tout en préservant l'eau (2 500 litres pour 1 tonne de plastique recyclé). Enfin, le recyclage permet d'éviter l'enfouissement de contenants et de matériaux qui occupent un volume important dans les lieux d'enfouissement pendant plusieurs centaines d'années.

c) Verre

Comme le plastique, le verre est une matière inerte et ne se transforme pas. sa décomposition nécessite environ 4000 ans d'où l'importance de le recycler. D'autant plus que fabriquer du verre nécessite beaucoup d'énergie, car le mélange de base comprenant du sable, du carbonate de sodium et de la chaux doit être amené à une température variant entre 1500 °C et 1600 °C pour fabriquer un objet de verre. Recycler le verre, qu'il soit brun, vert ou Clair, permet une économie énergétique de 30%. 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% !

d) Métal

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.

e) Aluminium

Le recyclage de l'aluminium a des avantages tel que :

- 1 tonne d'aluminium recyclé, c'est 6 tonnes de gaz à effet de serre évités ;
- En recyclant une seule canette d'aluminium, on économise assez d'énergie pour alimenter une ampoule de 100 watts durant 20 heures.
- L'aluminium recyclé prend la forme de canettes, de papier d'emballage, de mobilier de jardin et de pièces automobiles.

2. Les déchets naturels et industriels

f) Acier

Actuellement, 65 % des produits fabriqués en acier sont à partir d'acier recyclé.

- L'acier de 6 châssis de voitures recyclés peut fournir la charpente d'une maison (en termes de bois, on parle de 40 arbres) ;
- L'acier récupéré entre dans la fabrication de pièces pour les moteurs, de structures d'acier et de boîtes de conserve.

Tableau 2. 1 : Durée de décomposition de certains types de déchets industriels

« Déchets »	Durée de décomposition
Morceau d'acier	100 ans
Cannette d'aluminium	200 à 500 ans
Boîte de conserve	10 à 100 ans

Tableau 2. 2 : Économies de ressource par le recyclage de différents matériaux

Matières	Économies		
	Énergie	Matières premières	Eau
Aluminium (1 cannette)	95%	8 kg bauxite 4 kg produits chimiques	8 m3 (pour 1 tonne)
Acier (1 tonne)	61 à 70%	1 100 kg minerai de fer 635 kg charbon 54 kg calcaire	40%
Plastique (1 tonne)	57 à 75%	700 kg pétrole brut	2 500 litres
Papier (1 feuille)	25 à 45%	15 grammes de bois	1 litre (58 à 90%)
Verre (1 kg)	25 à 31%		50%
Carton (1 tonne)		2.5 tonnes de bois	

2.5 Conclusion

Les déchets, qu'ils soient naturels ou industriels, sont une réalité omni présente dans notre environnement moderne. La notion de déchet est définie comme tout objet ou substance ayant perdu son utilité pour son propriétaire et devant être éliminé. Cette définition juridique englobe diverses formes de déchets, allant des résidus de production et de transformation aux produits abandonnés par leur détenteur. Les déchets se différencient par leur composition et leur origine, ce qui les classe dans différentes catégories.

La classification des déchets varie selon les lois nationales, mais comprend généralement les déchets ménagers, les déchets spéciaux (y compris les déchets dangereux) et les déchets inertes. Les déchets ménagers proviennent des activités domestiques et des entreprises, tandis que les déchets spéciaux incluent des matériaux toxiques pour la santé humaine et l'environnement. Les déchets inertes, principalement issus du secteur de la construction, sont des matériaux qui ne se dégradent pas et ne réagissent pas chimiquement. En fonction de leur origine, il est possible de classer les déchets en différentes catégories telles que les déchets industriels, hospitaliers, agricoles, etc. Les déchets industriels proviennent des activités commerciales, artisanales et industrielles, et peuvent être inertes, peu spécifiques ou spéciaux, nécessitant des méthodes de gestion adaptées. Les déchets hospitaliers, eux, présentent un risque potentiel de contamination et doivent être manipulés et éliminés de manière spécifique pour éviter tout danger pour la santé publique. La gestion des déchets comprend diverses étapes, telles que la collecte, le tri, le traitement et l'élimination. La collecte peut être sélective ou non, en fonction de la séparation ou non des différents types de déchets. Le tri des déchets est essentiel pour faciliter leur traitement ultérieur, qui peut inclure la réduction à la source, le réemploi, le recyclage ou l'incinération. L'élimination des déchets, qu'elle soit thermique, physico-chimique, biologique ou enfouissement, vise à réduire leur impact sur l'environnement et la santé publique.

Enfin, la nature physique des déchets peut varier en fonction de plusieurs éléments tels que le climat, la saison, le mode de vie, etc. Les déchets organiques, comme les restes de repas, les épluchures de fruits, etc., représentent une portion importante des déchets domestiques. Le recyclage de matériaux tels que le papier, le plastique, le verre et les métaux aide à préserver les ressources naturelles et à diminuer l'impact environnemental des activités humaines.

Chapitre III
Matériaux et méthodes
expérimentales.

3 Matériaux et méthodes expérimentales

Cette partie présente l'élaboration et les méthodes de caractérisation mécaniques des matériaux composites. Dans la partie de l'élaboration des matériaux composites, on décrit les différents types des matrices et les renforts utilisés et leurs méthodes de préparation. Suivi par les étapes de préparation des matériaux composites. La dernière partie présente la méthode expérimentale utilisée pour déterminer les propriétés mécaniques des matériaux composites étudiés.

3.1 Elaboration des matériaux composites

3.1.1 Préparation de la matrice

a) Matrice EPS recyclé

Les premiers types des matériaux composites ont été préparés en utilisant une matrice obtenue par le recyclage des déchets en EPS. Pour la préparation de la matrice à base de déchets de l'EPS, l'EPS est recyclé en le dissolvant dans l'essence pendant quelques minutes afin d'obtenir une pâte lisse. L'EPS utilisé est de densité de 15 kg/m³, comme illustré dans la figure 3.3. Le rapport massique entre l'essence et l'EPS est donné par :

$$\frac{m_{\text{essence}}}{m_{\text{polystyrène}}} = 2$$



Figure 3. 1: Recyclage du polystyrène par l'essence (Matrice EPS).

b) Résine en Polyester

Pour la préparation du deuxième type des matériaux composites une résine de polyester a été utilisée. Les résines polyester sont de plus en plus utilisées comme matrices de résine pour les

3. Matériaux et méthodes expérimentales

matériaux composites tels que les composites polymères avancés et les composites hybrides. La résine polyester est une résine fragile malgré ses hautes performances dans de nombreux domaines, mais elle est largement utilisée comme matériau hautement réticulé dans de nombreuses applications nécessitant des performances exceptionnelles.

c) Matrice hybride

Le troisième type des matériaux composites est obtenu en utilisant une matrice hybride composée de 50% de la première matrice (Matrice EPS recyclé) et 50% de polyester.

3.1.2 Préparation du renfort

Les particules de caoutchouc (granulés) issues des pneus usagés sont recyclées comme renfort dans la préparation des matériaux composites. À cette fin, les pneus usagés ont été nettoyés puis broyés à l'aide d'un broyeur à engrenages. Ensuite, le broyat a été trié pour séparer les fibres métalliques et les agrégats de caoutchouc (figure 3.2-a). Le broyat a été tamisé à l'aide d'une machine Retsch AS200 (figure 3.2-b). Pour avoir une répartition similaire des particules de renforcement dans chaque cas, une quantité de 500 g a été tamisée pendant 10 min avec une amplitude de tamisage égale à 1,5. La figure 1 montre les différentes tailles de particules utilisées pour élaborer le matériau composite. Pour étudier l'effet de la taille des particules sur le comportement mécanique et physique, trois tailles (2-3 mm, 3-4 mm et 4-5 mm) ont été considérées.



Figure 3. 2: a) Particule de caoutchouc de pneus, b) Tamiseuse Retsch AS200

3.1.3 Préparation d'éprouvettes

Dans cette étude, les trois matrices, citées précédemment, ont été utilisées avec différentes tailles de renfort en particules de caoutchouc des pneus pour la préparation des matériaux composites. Différentes proportions massiques (25%, 30% et 35%) entre la matrice (EPS, RP et EPS-RP) et le renfort en particule de caoutchouc des pneus (PCP) ont été considérées.

Dans l'élaboration des matériaux composites, la matrice ((EPS, RP et EPS-RP) est mélangée avec les PCP l'aide d'un mélangeur pendant 10 min pour avoir une distribution régulière des PCP dans la matrice. Ensuite, le mélange est versé dans des moules cylindriques pour avoir des éprouvettes de compression selon la norme NF P94-420 [26]. A l'aide d'une presse hydraulique, une pression de 2.5 bar a été appliquée pour avoir une répartition homogène des particules et pour réduire l'air du matériau composite (Figure 3.3). Les éprouvettes ont été séchées dans une étuve à une température de 60°C pendant 72 heures. Après séchage les éprouvettes ont été démoulées des moules plastiques (Figure 3.3).

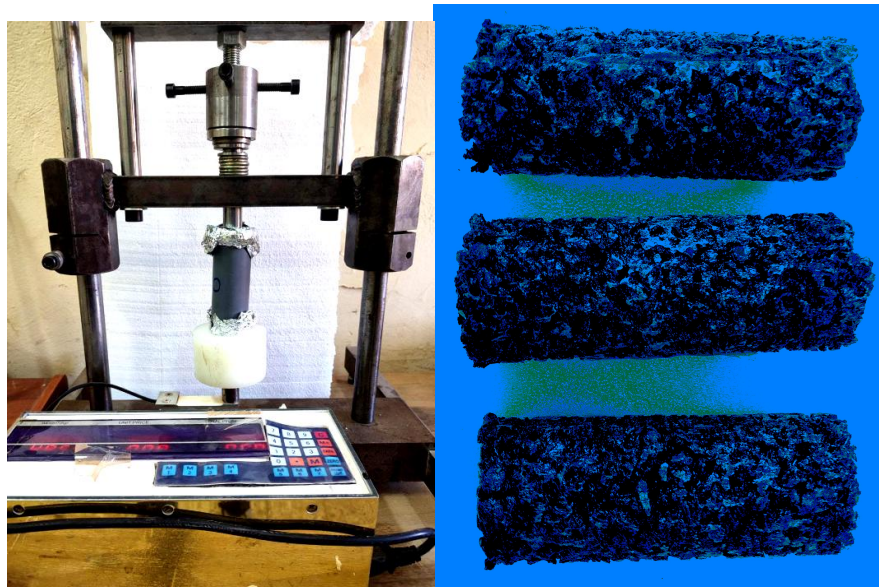


Figure 3. 3: Epreuve de compression

Le tableau 3.1 présente les différents cas des matériaux composites étudiés.

Tableau 3. 1 : Les différents cas des matériaux composites étudiés

L'échantillons	Taille du renforts (mm)	Matrice (poids %)		Renfort (Poids %)
		EPS	Polyester	
E25	3-4	25	0	75
E30		30	0	70
E35		35	0	65
P25		0	25	75
P30		0	30	70
P35		0	35	65
A25	2-3	12.5	12.5	75
A30		15	15	70
A35		17.5	17.5	65
B25	3-4	12.5	12.5	75
B30		15	15	70
B35		17.5	17.5	65
C25	4-5	12.5	12.5	75
C30		15	15	70
C35		17.5	17.5	65

- E25, E30, E35 : Matériaux composites à base d'une matrice EPS recyclé.
- P25, P30, P35 : Matériaux composites à base d'une matrice polyester.
- A, B, C : Matériaux composites à base d'une matrice hybride

3.2 Caractérisation expérimentale des matériaux composites

Afin de déterminer les propriétés mécaniques des matériaux composites élaborés, tel que la résistance à la compression et le module de Young, des essais de compressions ont été effectués sur des éprouvettes de compression. Une machine de traction/compression « Test » a été utilisée pour réaliser l'essai de compression afin de déterminer la charge et le déplacement dans chaque instant avec une vitesse chargement de 5 mm/min a été appliquée (Figure 3.4). Pour chaque cas, trois échantillons ont été testé.



Figure 3. 4: Epreuve en compression non déformé et déformé.

Après avoir les résultats charge/déplacement, la contrainte de compression (σ) et la déformation en compression (ε) sont calculé respectivement par :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{et} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{(l_0 - l)}{l_0}$$

Avec :

F(N) : Charge appliquée.

S(mm²) : Section normale de l'éprouvette.

l₀ (mm) : La longueur initiale de l'éprouvette.

l (mm) : longueur de l'éprouvette après déformation.

Chapitre IV

Caractérisation mécaniques des matériaux composites : Résultats et discussions.

4 Caractérisation mécanique des matériaux composites : Résultats et discussions

Cette partie représente une caractérisation mécanique de trois matériaux composites à base de trois matrices différentes qui sont :

- Matrice obtenue par le recyclage du polystyrène expansé (EPS).
- Matrice de résine Polyester (RP)
- Matrice mixte EPS/RP composé de 50% EPS et 50% résine Polyester.

4.1 Effet des propriétés mécaniques de la matrice sur le comportement du matériau composite

Pour étudier l'effet de la matrice sur le comportement mécanique du matériau composite, la taille du renfort est fixée ou une granulométrie de 3-4 mm est considérée. Le renfort utilisé est constitués de particules de caoutchouc de déchets des pneus (PCP) avec différents proportion massique entre la matrice et le renfort. Afin de déterminer les propriétés mécaniques du matériau composite, tel que la contrainte maximal et le module de Young, des essais de compression ont été réalisé sur des éprouvettes de dimension standard selon la norme NF P94-420 [26].

4.1.1 Matériau composite EPS/PCP

La Figure 4.1 représente la courbe contrainte/déformation du matériau composite EPS/PCP élaboré nommé E% (E25, E30 et E35). D'après les résultats obtenus on remarque qu'il y a deux parties, une partie linéaire et une partie non linéaire. La partie linéaire représente le domaine élastique du matériau composite et la partie non linéaire représente la partie plastique. On observe aussi que l'augmentation de la quantité de la matrice ESP, de 25% à 35% en masse, dans le matériau composite augmente la rigidité du matériau avec une rupture fragile. Cette augmentation est due à l'augmentation de la surface d'adhérence entre la matrice et le renfort et la réduction de l'aire dans le matériau.

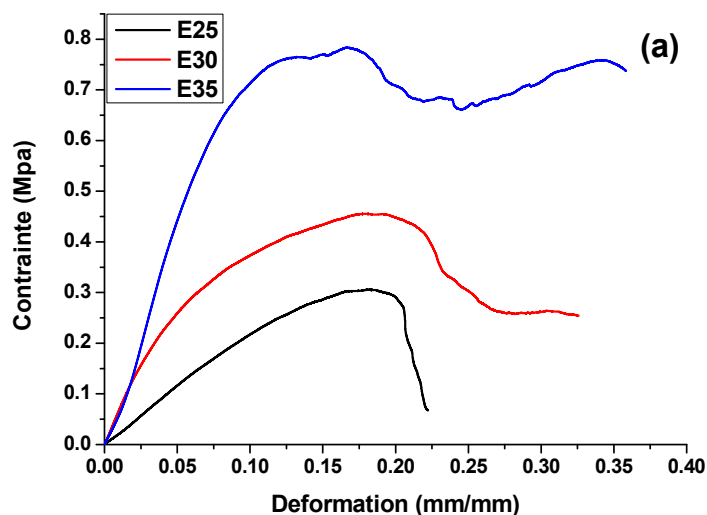


Figure 4. 1: Comportement mécanique du matériau composite EPS/PCP de différentes proportions.

4.1.2 Matériau composite Polyester/PCP

La Figure 4.2 représente la courbe contrainte/déformation du matériau composite Polyester/PCP élaboré nommé P% (P25, P30 et P35). Les résultats obtenus montrent la présence que la partie linéaire. La partie non linéaire est négligée par rapport à la partie linéaire. D'après la Figure 4.2, on observe aussi, lorsque la quantité du polyester (P) augmente la rigidité du matériau composite augmente. Même explication, cité précédemment dans le cas de l'usage du polyester.

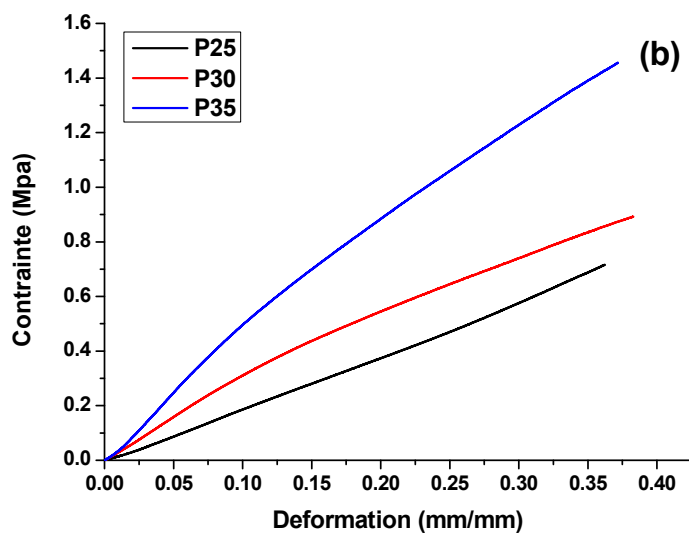


Figure 4. 2: Comportement mécanique du matériau composite Polyester/PCP de différentes proportions.

4.1.3 Matériau composite EPS+RP/PCP

D'après les résultats précédents, on remarque que le matériau composite obtenu avec la matrice EPS présente des propriétés faibles par rapport au matériau composite obtenu avec la matrice. Pour des raisons économiques et afin d'améliorer les propriétés mécaniques du matériau composite, une matrice hybride (50% EPS avec 50% Polyester) a été utilisée dans l'élaboration du troisième matériau composite nommé B% (B25, B30 et B35).

La figure 4.3, représente la courbe contrainte/déformation de l'essai de compression. D'après les résultats, les mêmes remarques ont été observées lors de l'augmentation de la quantité de la matrice dans le composite.

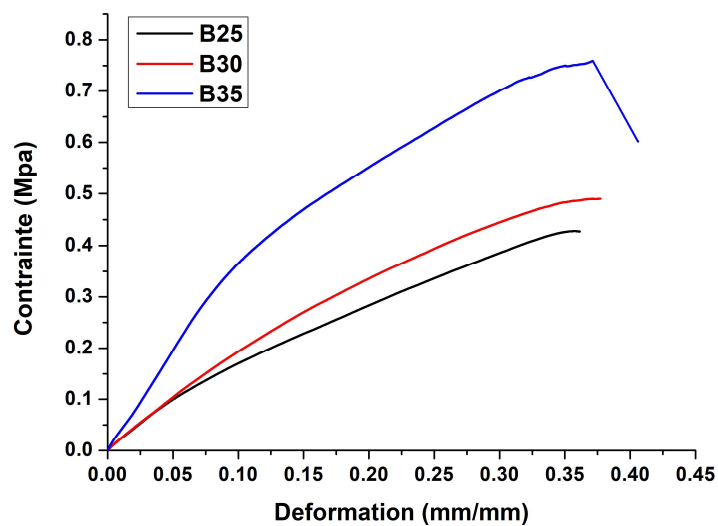


Figure 4. 3: Comportement mécanique du matériau composite /PCP de différentes proportions.

4.1.4 Etude comparative entre les composites EPS/PCP, Polyester/PCP et B/PCP

a) Comportement mécanique des matériaux composites

Les figures 4.4, b et c représentent le comportement mécanique des trois matériaux composites obtenus par trois différentes matrices EPS, Polyester et la matrice hybride EPS+Polyester.

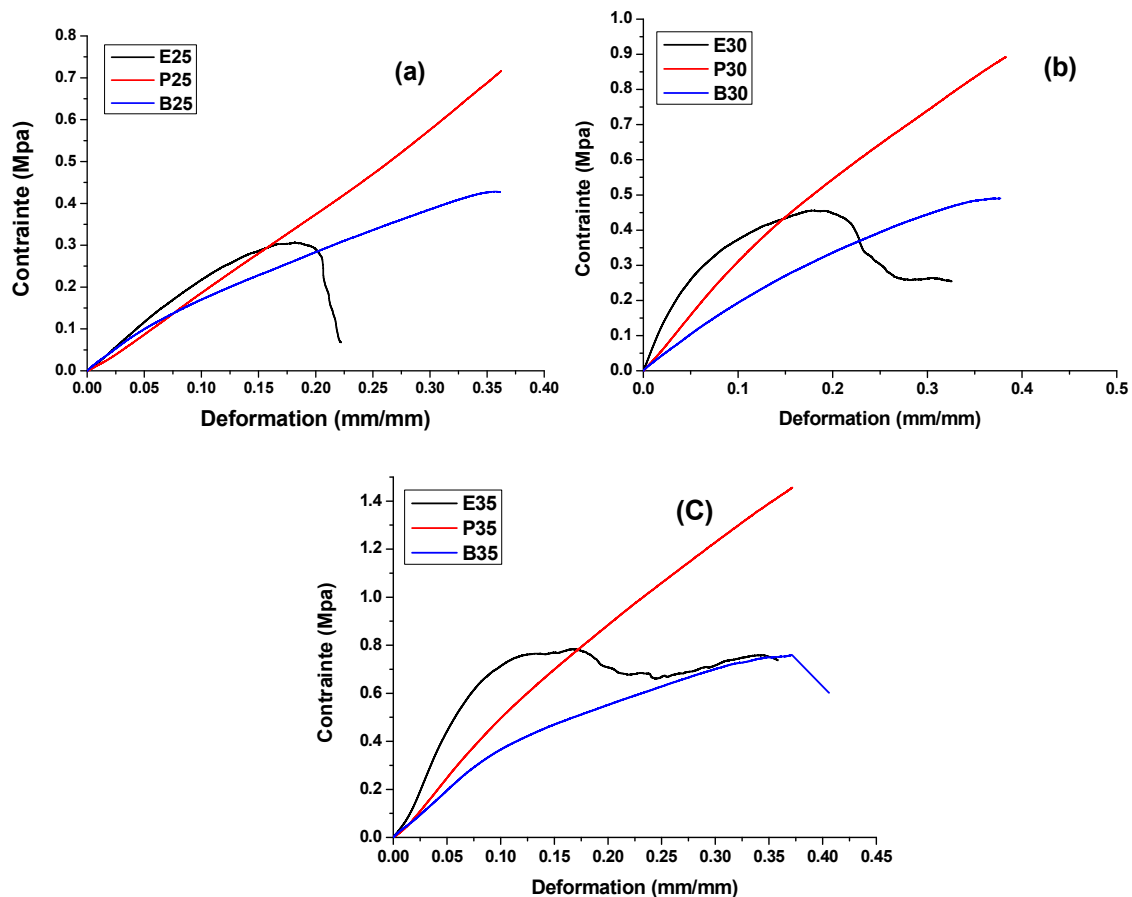


Figure 4. 4: Courbe Contraite/Déformation des composites de trois matrices différentes.

D'après les figures, on remarque que les matériaux composites obtenus par la matrice EPS, E25-E30-E35, sont plus rigides que les deux autres matériaux obtenus par la matrice Polyester, P25-P30-P35, et la matrice Hybride EPS+Polyester, B25-B30-B35. Par contre, les matériaux composites E25-E30-E35 représentent des déformations faibles par rapport aux matériaux P25-P30-P35 et B25-B30-B35. L'ajout de la matrice Polyester à la matrice EPS rend le matériau plus ductile et augmente la déformation à la compression.

b) Module d'élasticité

La figure 4.5 représente les modules d'élasticité des matériaux composites étudiés. On observe que l'augmentation de la quantité de la matrice de 25% à 35%, augmente le module de Young des matériaux composites élaborés. Le module de Young des matériaux composites élaborés varie de 1.75-6.75 MPa. Généralement, les matériaux composites E25, E30 et E35 ont des modules de Young de 2.5-6.75 MPa. Les matériaux composites, E25, E30 et E35, présentent des modules de Young plus grande que les matériaux composites P25, P30, P35 (1.75-5 MPa) et les

matériaux composites B25, B30 et B35 (2.0-6.5 MPa). Cette rigidité est due à la nature de la matrice EPS qui est plus rigide aux autres matrices utilisées. L'ajout de la matrice polyester à la matrice EPS améliore la rigidité du matériau composite par rapport à la rigidité du composite obtenu par la matrice polyester. Cette amélioration réduit la quantité du polyester dans la matrice, donc réduit le coût du matériau composite. D'après les résultats, on constate que l'usage de la matrice hybride d'une quantité de 35% dans le matériau composite donne une résistance à la compression similaire à celle du composite à base d'une matrice EPS.

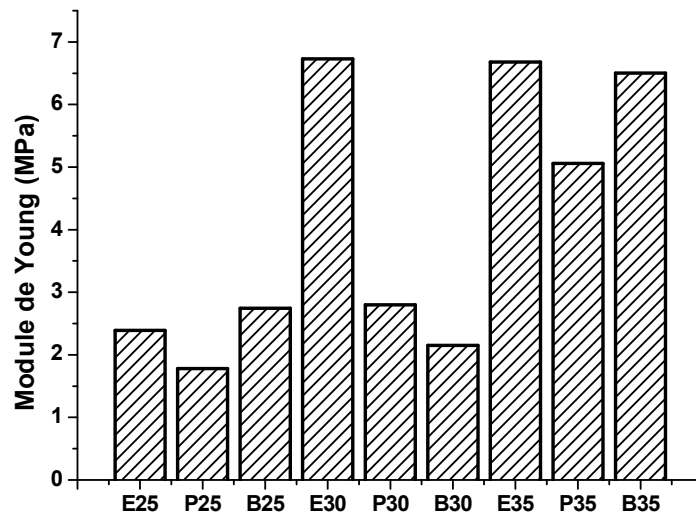


Figure 4. 5: Module de Young des composites à base de trois différentes matrices.

c) Contrainte maximal à la compression

La figure 4.6 représente la résistance à la compression des matériaux composites étudiés. De même, l'augmentation des quantités de la matrice, EPS, Polyester ou hybride, améliore la résistance à la compression des matériaux composites élaborés de 0.3 à 1.2 MPa. De plus, on observe que les matériaux composites à base d'une matrice polyester (P25, P30 et P35) représentent une résistance, de 0.7 à 1.2 MPa, plus grandes que les les deux autres matériaux à base de EPS (0.3-0.8 MPa) et de la matrice hybride (0.4-0.7 MPa). Généralement, l'utilisation de la matrice hybride dans l'élaboration du matériau composite (B25, B30 et B35) réduit la résistance à la traction par rapport au matériau composite élaboré par la matrice polyester, par contre la résistance est amélioré par rapport au composite élaboré par la matrice EPS.

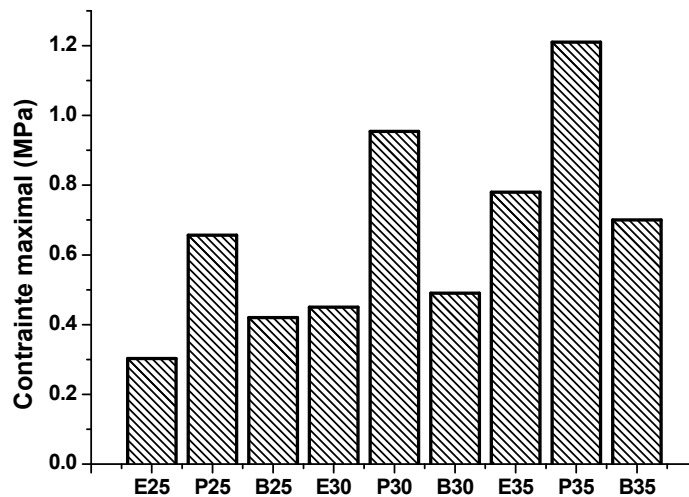


Figure 4. 6: Résistance à la compression des composites à base de trois différentes matrices.

4.2 Effet de la taille du renfort sur les propriétés mécaniques des matériaux composites

Cette partie concerne la caractérisation mécanique des matériaux composites à base d'une matrice hybride (50% EPS recyclé et 50% Résine Polyester) et de déchet en caoutchouc des pneus usés. Afin d'étudier l'effet de la taille du renfort sur le comportement mécanique du matériau composite, tel que la résistance à la compression et la rigidité du matériau, trois granulométries 2-3, 3-4 et 4-5 mm ont été considérées.

4.2.1 Comportement mécanique des matériaux composites

Les figures 4.7-a, 4.7-b et 4.7-c représente les courbes contrainte/déformation des trois matériaux composites avec un renfort de tailles 2-3, 3-4 et 4-5 respectivement. D'après les résultats obtenus, observe que l'augmentation de la quantité de la matrice dans le composite améliore la rigidité du matériau quelque soit la taille du renfort. Cette amélioration est due à l'augmentation des liaisons entre la matrice et le renfort et due aussi à la réduction de l'air dans le matériau composite en augmentant la quantité de la matrice. La rupture du matériau composite change du mode ductile au fragile en augmentant la taille du renfort (Figure 4.7).

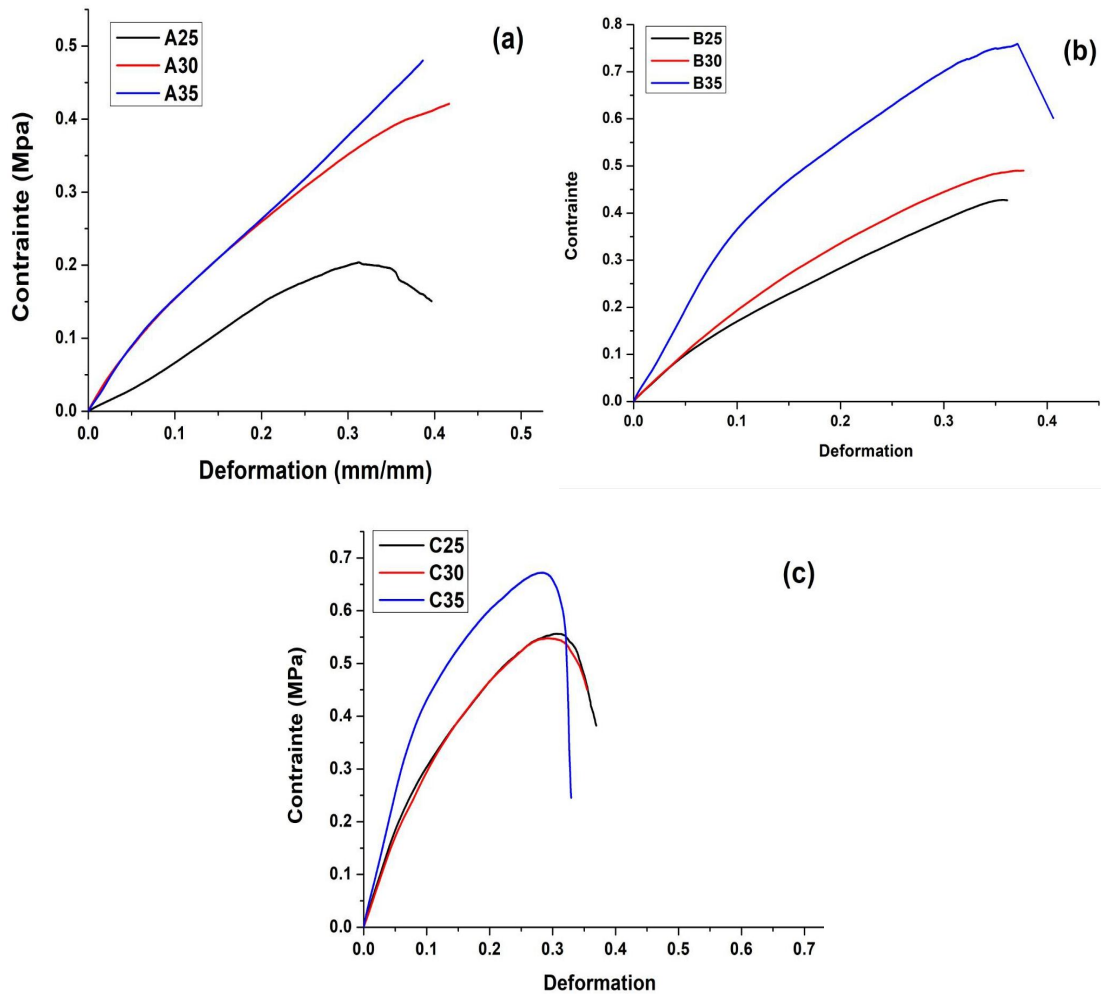


Figure 4. 7: Courbes contrainte/déformation

4.2.2 Module d'élasticité

La figure 4.8 représente les modules d'élasticité de différents matériaux composites étudiés. Les résultats montrent que le module de Young est très faible (0.5 MPa) dans le cas où la taille du renfort est petite avec une faible quantité de la matrice hybride (Cas A25). Par contre une amélioration a été enregistrée (6.5 MPa) lors l'augmentation de la taille du renfort avec la même quantité de la matrice (Cas C25). De plus dans le cas d'une granulométrie moyenne (3-4 mm), on observe que l'augmentation de la quantité de la matrice augmente la rigidité du matériau composite. Par contre, dans les deux autres granulométries (2-3 mm et 4-5 mm) le comportement mécanique est différent.

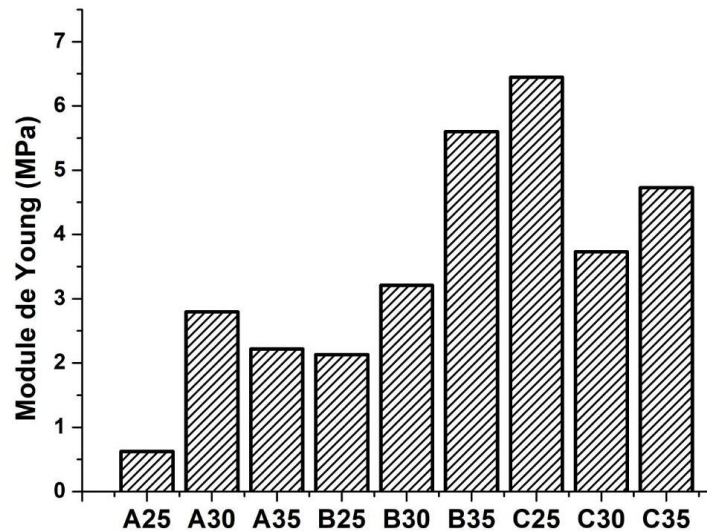


Figure 4. 8: Module d'élasticité de différents matériaux composites étudiés.

4.2.3 Résistance à la compression

La figure 4.9 montre les contraintes maximales obtenues par l'essai de compression de différents matériaux composites étudiés. D'après les résultats obtenus, on observe que l'augmentation de la quantité de la matrice de 25% à 30% augmente la résistance du matériau. Au de la de 30%, l'augmentation de la quantité de la matrice hybride influe inversement sur la rigidité du matériau. De plus, l'augmentation de la taille du renfort de 2-3 mm à 4-5mm améliore la résistance à la compression du matériau. Cette amélioration est due à l'augmentation de la surface entre la matrice et le renfort et aussi à l'adhérence entre matrice/renfort. Les résultats montrent aussi, que la taille 3-4 mm du renfort donne des bons résultats par rapport aux autres granulométries (2-3 et 4-5 mm). La contrainte maximale des matériaux composites élaborés varie de 0.2 MPa (A25) à 0.7 MPa (B35). Une augmentation de 0.15- 0.2 MPa (C35-A35) a été obtenus par rapport au matériau B35, soit une augmentation de plus de 21%.

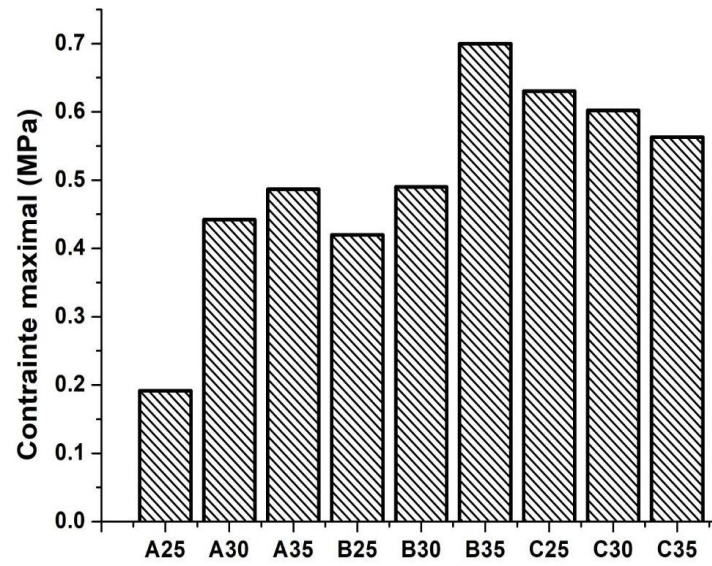


Figure 4. 9: Résistance à la compression de différents matériaux composites étudiés.

Conclusion générale

5 Conclusion générale

Ce travail représente une étude expérimentale sur des matériaux composites à base des déchets industriels. L'objectif principale de cette étude est la faisabilité de l'usage d'un nouveau concept d'une matrice, appelé Matrice hybride, dans l'élaboration des matériaux composites. L'avantage de ce concept est la réduction de la quantité de la matrice polyester dans l'élaboration des matériaux qui réduit le coût de la production. Dans cette étude des recherches bibliographiques sur ; les matériaux composites, les déchets industriel et naturel ont été réalisés. Dans la partie expérimentale, les déchets industriels, tel que le polystyrène expansé (EPS) a été valorisé dans la production d'une matrice, et les déchets des pneus usés ont été utilisé comme un renfort. Pour l'élaboration des matériaux composites, différentes matrices ont été utilisé, tel que la matrice EPS obtenus par le recyclage de EPS avec l'essence, une résine de polyester et une matrice hybride composé de 50% de la matrice EPS recyclé et 50% de la résine polyester. Afin d'étudié l'effet de la taille de renfort sur le comportement mécanique du matériau, trois granulométrie en particule de caoutchouc (2-3mm, 3-4mm et 4-5mm) ont été considérés dans l'élaboration des matériaux composites. Des essais de compression ont été réalisés sur des épreuves normalisés afin de déterminer la résistance à la compression et le module de Young des matériaux composites.

Dans la première partie de l'étude expérimentale, trois matériaux composites à base de trois matrices différentes, EPS recyclé, la résine polyester et la matrice hybride ont été élaboré avec la même granulométrie (3-4mm) afin de voir la différence entre l'usage de matrice hybride par rapport à la matrice EPS recyclé et la matrice polyester. Une étude comparative entre les trois matériaux composites a été effectuée. Généralement, les résultats ont montrés que l'usage de la matrice hybride améliore la rigidité du matériau (Matériau fragile) par rapport au matériaux composites à base d'une matrice EPS ou d'une résine polyester par contre réduit la résistance à la compression des matériaux.

La deuxième partie expérimentale concerne l'effet de la taille du renfort sur le comportement mécanique des matériaux composite à base de la matrice hybride. Les résultats ont montrés que l'augmentation de la taille du renfort améliore la rigidité et la résistance des matériaux composites. La matrice hybride est une solution pour améliorer les propriétés mécanique d'un matériau composite et un concept pour réduire le cout de production. Les résultats obtenus dans cette études peuvent être amélioré ont utilisant d'autre propositions entre les éléments de constituant la matrice ainsi d'utilisé d'autre résine.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Kaw, A.K., *Mechanics of composite materials* 2005: CRC press.
2. Ljungberg, L.Y., *Materials selection and design for development of sustainable products*. Materials & Design, 2007. **28**(2): p. 466-479.
3. Zhang, M.Q., M.Z. Rong, and X. Lu, *Fully biodegradable natural fiber composites from renewable resources: all-plant fiber composites*. Composites Science and technology, 2005. **65**(15): p. 2514-2525.
4. Cheung, H.-y., et al., *Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(7): p. 655-663.
5. Herakovich, C.T., *Mechanics of composites: a historical review*. Mechanics Research Communications, 2012. **41**: p. 1-20.
6. Mitra, B., R. Basak, and M. Sarkar, *Studies on jute-reinforced composites, its limitations, and some solutions through chemical modifications of fibers*. Journal of Applied Polymer Science, 1998. **67**(6): p. 1093-1100.
7. Madurwar, M.V., R.V. Ralegaonkar, and S.A. Mandavgane, *Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review*. Construction and building materials, 2013. **38**: p. 872-878.
8. Almi, K., et al., *Potential utilization of date palm wood as composite reinforcement*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2015. **34**(15): p. 1231-1240.
9. Korjenic, A., J. Zach, and J. Hroudová, *The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building constructions*. Energy and buildings, 2016. **116**: p. 45-58.
10. AL-Oqla, F.M., et al., *Processing and properties of date palm fibers and its composites*, in *Biomass and Bioenergy* 2014, Springer. p. 1-25.
11. Gornet, L., *Généralités sur les matériaux composites*. 2008.
12. Berthelot, J.-M., *Mécanique des matériaux et structures composites*. Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, 2010. **176**.
13. MOUMENE, T., *Les composites*. 2022.
14. KHAROUBI, M., *Etude du comportement mécanique de matériaux composites sous chargement cyclique et dynamique*, 2009.
15. El Zahraa, M.F., *Contribution d'élaboration d'un matériau léger à partir des déchets des palmiers dattiers (pétiole)*.
16. Chazara, P., *Outils d'élaboration de stratégie de recyclage basée sur la gestion des connaissances: application au domaine du génie des procédés*, 2015.
17. Meriem, A., *Optimisation de la gestion des déchets ménagers dans quelques villes de l'Ouest algérien*, 2017, Thèse unique, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Algérie.
18. Balet, J.-M., *Gestion des déchets-6e éd.: Les différents types de déchets, les modes de collecte et de gestion, les filières de traitement* 2023: Dunod.
19. René, M., *Le traitement des Déchets* 2009: Lavoisier.
20. Djemaci, B., *La gestion des déchets municipaux en Algérie: Analyse prospective et éléments d'efficacité*, 2012, Université de Rouen.
21. Balet, J.-M., *Aide-mémoire-Gestion des déchets- 3 ème. Eyrolles*, 2011.
22. Damien, A., *Guide du traitement des déchets* 2004: Dunod Paris.
23. Djemaci, B., *La gestion des déchets municipaux en Algérie*. Université de Rouen, France, Analyse et prospective et éléments d'efficacité. These de doctorat, 2012.
24. Damien, A., *Guide du traitement des déchets-5ème édition* 2009: Hachette.
25. 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.
26. AFNOR, S., *NF P94-420. Détermination de la résistance à la compression uniaxiale*, 2000.