

Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'étude pour
L'obtention de Diplôme de Master

Option : Construction Mécanique

Présenté par : BENAMEUR Heythem

=====

Élaboration et caractérisation des
biocomposites à matrice thermoplastique
renforcés par des fibres végétales

=====

Sous la Direction de :

Pr. BEAZI Abderrezak

JUIN 2022

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier notre DIEU, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à mes parents pour leur encouragement.

*Ainsi que pour le Professeur **BEZAZI Abderrezak** de m'avoir encadré, pour son accueil au laboratoire **LMANM**, sa compréhension, sa patience, ces conseils et son soutien afin de réaliser ce travail*

Je présente mes chaleureux remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Trouvent ici l'expression de mes profondes gratitude et respects.

Dédicace

À mes chers parents

Qui sont la joie de ma vie et qui me procurent tant de soutien, d'amour et d'affection, ma moindre réussite est le fruit de leur sacrifice, dévouement et persévérance, je leur dédie ce Travail en signe d'une sincère reconnaissance et d'une gratitude éternelle.

A mes chères sœurs et à mon frère et à tous les membres de ma famille Qui ont toujours été affectueux et serviables en témoignage de mon amour, je vous souhaite la bonne santé.

À tous mes fidèles amis pour leur aide et leur encouragement.

À tous ceux qui ont contribué à ma formation Que ce travail soit l'expression de ma vive gratitude et de mon profond attachement.

Résumé

Ce travail représente l'effet de la contribution de l'ajout des fibres végétales et synthétiques (fibres de palmier et de verre) dans une matrice thermoplastique recyclé sur le comportement et les caractéristiques mécaniques en traction statique et par les tests Charpy. L'objectif de cette étude comparative est la caractérisation de différents matériaux composites à matrice thermoplastique élaborés à l'aide d'une presse à chaud. L'ajout des fibres de palmier et de verre dans les matériaux polymères représente une voie prometteuse car elle permet d'une part l'amélioration de l'ensemble des propriétés des matériaux et d'autre part à préserver l'environnement par l'utilisation de produits recyclés et/ou des fibres végétales biodégradable.

Mot clé : Fibre végétale, résine thermoplastique recyclé, caractérisation mécanique, traction, Charpy.

Abstract

This work represents the effect of the contribution of the addition of vegetable and synthetic fibres (palm and glass fibres) in a recycled thermoplastic matrix on the behaviour and the identification of the mechanical characteristics under tensile and by Charpy tests. The objective of this comparative study is the characterization of different composite materials with thermoplastic matrix produced using a hot press. The addition of date palm and glass fibres in polymer materials represents a promising way because it allows the one hand by improving all the properties of the materials and on the other hand to preserve the environment by use of recycled products and/or biodegradable vegetable fibres.

Key word: Plant fiber, recycled thermoplastic resin, mechanical characterization, traction, Charpy.

تلخيص

يمثل هذا العمل تأثير إضافة الألياف النباتية والاصطناعية (النخيل والألياف الزجاجية) في مصفوفة لدن بالحرارة معاد تدويرها على السلوك والخصائص الميكانيكية في الجر الساكن واختبارات شاربي. الهدف من هذه الدراسة المقارنة هو توصيف العديد من المواد المركبة باستخدام مصفوفة لدن بالحرارة مطورة باستخدام مكبس ساخن. تمثل إضافة ألياف النخيل والزجاج في مواد البوليمر طريقة واعدة لأنها تتيح من ناحية تحسين جميع خصائص المواد ومن ناحية أخرى للحفاظ على البيئة باستخدام المنتجات المعاد تدويرها و / أو الألياف النباتية القابلة للتحلل.

الكلمة الأساسية: ألياف نباتية ، راتينج لدن بالحرارة معاد تدويره ، توصيف ميكانيكي ، جر ، شاربي

SOMMAIRE

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES MATÉRIAUX COMPOSITES

I.1	Introduction	1
I.2	Matériaux composite	3
I.3	Différents type de matériaux composites	4
I.3.1.1	Constituent des matériaux composites	5
I.3.1.2	les renforts	5
I.3.1.3	Fibre courte	6
I.3.1.4	Fibre longue	6
I.3.2	Les matrice	7
I.3.2.1	Les thermoplastiques	7
I.3.2.2	Les thermodurcissables	8
I.4	Procédé de mise en œuvre des matériaux composites	9
I.4.1	Moulage au contact	9
I.4.2	Moulage par projection simultanée	10
I.4.3	Moulage par injection	11
I.4.4	Pultrusion	12
I.4.5	Moulage par enroulement filamentaire	13
I.5	Application des Matériaux composite	13
I.6	Etat de l'art	14
I.7	Conclusion	24

CHAPITRE II : ÉLABORATION ET CARACTERISATION DES MATIREAUX COMPOSITES

II.1	INTRODUCTION	26
II.2	Constituants des composites élaboré	27
I.2.2	Matrice	27
I.2.3	Renfort	27
II.3	Elaboration des plaques composites	29
II.3.1	Elaboration des plaques plastique	30
II.3.2	Elaboration des plaques composites	33
II.3.2.1	Composite renforcé par fibre de verre	33
II.3.2.2	Composite renforcé par fibre de palmier dattier	36
II.4	Découpe des plaques en éprouvettes	37
II.4.1	Découpe des plaques en éprouvettes de traction	37
II.4.2	Découpe des plaques en éprouvette pour l'essai Charpy	38
II.5	Caractérisation mécanique	39

II.5.1	Essai de Traction	39
II.5.2	Essai de Charpy	41
II.6	Conclusion	42

CHAPITRE III : RESULTAT ET DISSCUSSION

III.1	INTRODUCTION	45
III.2	Résultats et discussions	45
III.2.1	Essai de traction	45
III.2.1.1	Essai de traction pour éprouvette en plastique	46
III.2.1.2	Essai de traction éprouvette en fibre de verre	50
III.2.1.3	Essai de traction éprouvette en renfort par fibre de Palmier	65
III.2.2	Influence du matériau composite sur éprouvette	59
III.4	Essai de Charpy	63
III.5	Conclusion	67
	Conclusion générale	68
	Référence	69

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES MATÉRIAUX COMPOSITES

Figure I.1. Structure d'un matériau composite	4
Figure I.2. Matériau composite à fibre unidirectionnelle et bidirectionnelle	7
Figure I.3. Principe du moulage au contact	9
Figure I.4. Principe du moulage par projection simultanée	11
Figure I.5. Principe du moulage par injection	12
Figure I.6. Principe du moulage par pultrusion	12
Figure I.7. Principe du moulage de l'enroulement circonférentiel	13
Figure I.8. Le marché mondial des composite par application en 2000	14
Figure I.9. Micrographies SEM de (a, b) fibres de lin et (c, d) caractéristiques de défaillance du biocomposite PEHD/Flax. Matrix dans la section transversale	16
Figure I.10. Propriétés mécaniques des biocomposites HDPE/lin avec différentes fractions volumiques	17
Figure I.11. Photographies de (a) SF et (c) SESF; et images SEM de (b) SF et (d) SESF	19
Figure I.12. (a) Teneur en aldéhyde dans les fibres oxydées (b) rendements en fibres oxydées et en fibres oxydées/réduites	20
Figure I.13. Images SEM de RSF et RSESF: (a) RSF-2, (b) RSF-4, (c) RSF-6; (g) RSESF-2, (h) RSESF-4, (i) RSESF-6; (def) et, (jel) montrent des versions agrandies des régions marquées de cases jaunes	21
Figure I.14. Propriétés mécaniques du HSF et du HSESF à différents niveaux d'oxydation	22
Figure I.15. Analyse DMA de HSF et HSESF : Tan d en fonction de la température	23

CHAPITRE II : ÉLABORATION ET CARACTERISATION DES MATIREAUX COMPOSITES

Figure II.1. Les différentes étapes d'élaboration et caractérisation de matériaux bio-composite	26
Figure II.2. Plastique recyclé sous forme de granula	27
Figure II.3. Fibre de verre en tissu	28
Figure II.4. Fibre de palmier	28
Figure II.5. Presse hydraulique à chaud	29
Figure II.6. Etape de production d'une plaque plastique	32
Figure II.7. Préparation des plaques composites renforcées par fibre de verre	35
Figure II.8. Préparation des plaques renforcées par fibre de palmier dattier	36
Figure II.9. Découpe des plaques plastique et composite en éprouvettes de traction	37

Figure II.10. Eprouvette pour essai de Charpy	38
Figure II.11. Différentes éprouvettes obtenues pour les essais traction et Charpy	38
Figure II.12. Machine de Traction	40
Figure II.13. Equipement pour Charpy avec une éprouvette mise en essai	42

CHAPITRE III : RESULTAT ET DISSCUSSION

Figure III.1. Courbe de force-déplacement et contrainte-déplacement d'une éprouvette en plastique testé en traction avec une vitesse de 5 mm/min	47
Figure III.2. Evolution des faciès de rupture lors d'un essai de traction sur une éprouvette de plastique recyclée testé avec $V = 5$ mm/min	48
Figure III.3. Courbe de force-déplacement et contrainte-déplacement d'une éprouvette en plastique testé en traction avec une vitesse de 10 mm/min	49
Figure III.4. Courbe de force-déplacement et contrainte-déplacement d'une éprouvette en plastique testé en traction avec une vitesse de 50 mm/min	50
Figure III.5. Courbe Force -déplacement et Contrainte-déplacement d'une éprouvette en composite renforcé par des fibres de verre testé en traction avec une vitesse de 5 mm/min.	51
Figure III.6. Faciès de rupture d'une éprouvette en composite renforcé par des fibres de verre testée en traction avec une vitesse de 5 mm/min.	52
Figure III.7. Courbe Force -déplacement et Contrainte-déplacement d'une éprouvette en composite renforcé par des fibres de verre testé en traction avec une vitesse de 10 mm/min	53
Figure III.8. Courbe Force -déplacement et Contrainte-déplacement d'une éprouvette en composite renforcé par des fibres de verre testé en traction avec une vitesse de 50 mm/min	54
Figure III.9. Courbe force-déplacement et contrainte-déplacement des éprouvettes des composites renforcé par des fibres de palmier testés en traction avec une vitesse 5 mm/min	56
Figure III.10. Faciès de rupture d'un composite renforcé par des fibres de palmier dattier sollicité en traction avec une vitesse de 5 mm/min	56
Figure III.11. Courbe force-déplacement et contrainte-déplacement des éprouvettes des composites renforcé par des fibres de palmier testés en traction avec une vitesse 10 mm/min	57
Figure III.12. Courbe force-déplacement et contrainte-déplacement des éprouvettes des composites renforcé par des fibres de palmier testés en traction avec une vitesse 50 mm/min	59
Figure III.1. Courbe de comparaison de force-déplacement et contrainte-déplacement des éprouvettes en plastique et composite renforcé par des fibres de verre et de palmier testé en traction avec une vitesse de 5 mm/min	60
Figure III.14. Courbe de comparaison de force-déplacement et contrainte-déplacement des éprouvettes en plastique et composite renforcé par des fibres de verre et de palmier testé en traction avec une vitesse de 10 mm/min	61

Figure III.15. Courbe de comparaison de force-déplacement et contrainte-déplacement des éprouvettes en plastique et composite renforcé par des fibres de verre et de palmier testé en traction avec une vitesse de 50 mm/min.	62
Figure III.16. Faciès de rupture des éprouvettes en plastique testé par Charpy	65
Figure III.17. Faciès de rupture des éprouvettes en composite renforcé par des fibres de verre testées par Charpy	66
Figure III.18. Faciès de rupture des éprouvettes en composite renforcé par des fibres de palmier testées par Charpy	66

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES MATÉRIAUX COMPOSITES

Tableau I.1. Composition et désignation des quatre formulations différentes de biocomposites PEHD/lin	15
--	----

CHAPITRE III : RESULTAT ET DISSCUSSION

Tableau III.1. Dimensions des éprouvettes utilisées dans l'essai de traction	46
Tableau III.2. Valeur de résistance au choc pour les éprouvettes en plastique, composites plastique renforcés par des fibres de verre ou de palmier	64

INTRODUCTION GENERALE

Le développement des matériaux composites est né de la volonté d'allier les qualités techniques au besoin d'allégement dans un même matériau, qui par la suite doit s'adapter aux solutions technologiques des problèmes à résoudre. Un matériau composite résulte de l'association de deux matériaux différents aussi bien par leur forme que par leurs propriétés mécaniques ou chimiques pour tenter d'accroître leurs performances. Les deux constituants du composite sont la matrice et le renfort, qui en se combinant donnent un matériau hétérogène souvent anisotrope, c'est-à-dire dont les propriétés diffèrent suivant les directions. Les matériaux constituant le composite sont généralement choisis en fonction de l'application que l'on souhaite en faire par la suite. Les critères de choix peuvent être, par exemple, les propriétés mécaniques requises, la résistance à la chaleur ou à l'eau ou même la méthode de mise en œuvre.

Plus particulièrement, les matériaux composites à matrice organique et à renfort fibres naturelles trouvent de plus en plus d'applications dans la réalisation de pièces structurales de dimensions diverses dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique, la construction automobile, le bâtiment, l'industrie chimique, pétrochimique...etc.

Ces secteurs se sont tournés vers cette alternative pour leurs applications pour plusieurs raisons. En effet le remplacement des matériaux métalliques par ces matériaux composites a été motivé par l'allégement des structures à propriétés mécaniques égales voire supérieures à celles des pièces métalliques, le coût global modéré (matière première, mise en œuvre...etc.).

Le Premier chapitre consiste une recherche bibliographique sur les différents matériaux composites et leur constituant

Dans le deuxième chapitre présente les matériaux utilisés, les protocoles expérimentaux et les procédés de mise en œuvre pour l'élaboration des composites. Ainsi que la présentation des différentes techniques de caractérisation.

Le dernier chapitre sera consacré à la discussion des résultats obtenus à partir des différents tests effectués sur l'élaboration et la caractérisation des matériaux composites.

CHAPITRE I :

**ETAT DE L'ART SUR LES DIFFÉRENTS
MATÉRIAUX COMPOSITES**

I.1 Introduction

Les matériaux composites ont plusieurs propriétés qui se caractérisent d'une rigidité, une résistance mécanique et chimique, une ténacité élevée ainsi qu'une grande légèreté. Cependant, qui les rendent résistants le plus longtemps contre des phénomènes environnementaux.

Plus particulièrement, les matériaux composites à matrice thermoplastique et à renfort fibres naturelles trouvent de plus en plus d'applications dans divers secteurs industriels tels que l'aéronautique, la construction automobile, le bâtiment, l'industrie chimique, pétrochimique...etc.

Ce chapitre consiste une recherche bibliographique sur les différents matériaux composites et leur constituant

I.2 Matériaux composite

Un matériau composite est un matériau hétérogène formé d'au moins deux constituants non miscibles. [1]

Un composite est un matériau qui essaie de combiner les propriétés de ses composants pour permettre d'améliorer certaines caractéristiques comme la résistance à la rupture, ou la rigidité.

Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue ; La phase discontinue appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue (matrice) [2].

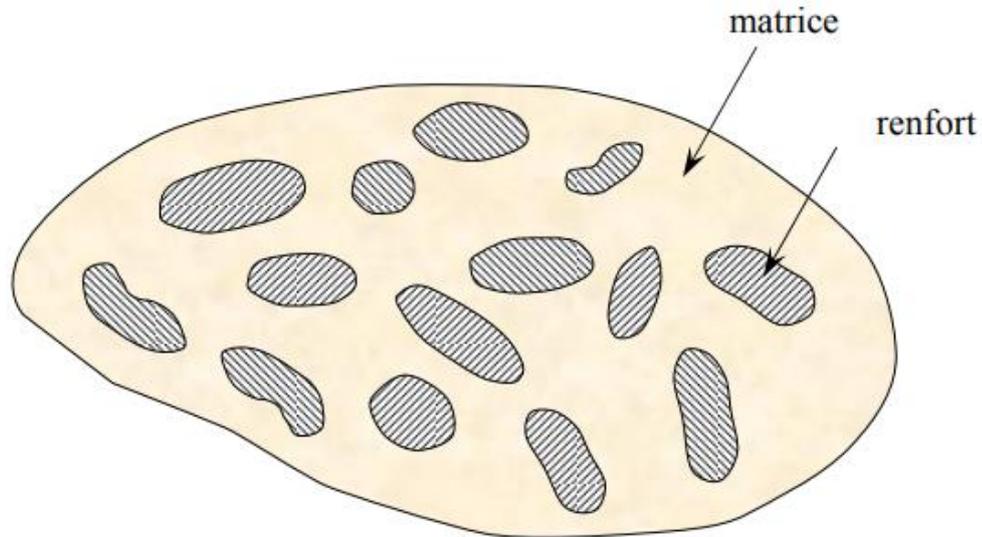


Figure I.1.structure d'un matériau composite [3].

I.3 Différents type de matériaux composites

Selon leur taux d'utilisation, les composites sont classés en deux grandes classes : les composites à grande diffusion et les composites hautes performances.

- Les matériaux composites dits de “grande diffusion” (**MCGD**) dont les propriétés mécaniques sont plus faibles mais d'un coût compatible avec une production en grande série. Ces matériaux représentent 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort avoisinant 30%. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'existe pas ou n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes. Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters (95% des résines thermodurcissables) avec des fibres de verre. Les renforts et les matrices sont à des coûts voisins [4].

- Les matériaux composites dits “hautes performances” (**MCHP**), présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées. Ainsi, ces matériaux, principalement utilisés dans l'aéronautique sont d'un coût élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%, et ce sont les renforts qui influent sur le prix. Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieures à

celles des métaux, contrairement aux **MCGD**. Des méthodes de calculs de structures et d'homogénéisations ont été développées pour les **MCHP**. Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien (civil et militaire), maritime et ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs, notamment grâce à leur bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier et à leur faible masse volumique [4]

II.3.1 Constituent des matériaux composites

En plus de deux composants de base (matrice et renfort), il faut ajouter : une interface qui assure la compatibilité, renfort-matrice, qui transfère les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif.

Les produits chimiques entrent également dans la composition du composite à l'interface, et ils affectent le comportement mécanique, mais n'interfèrent jamais réellement avec les calculs structuraux du composite [5].

On admette qu'un composite est différent des matériaux classiques où on adapte la conception d'une structure en fonction du matériau constitutif. Pour les composites, on construit sa structure à la demande :

- la nature, la texture et la forme du renfort
- le taux de renforcement
- la nature de la résine et des charges ou additifs
- la qualité de l'interface renfort-matrice
- la géométrie de la pièce à réaliser
- le procédé de mise en œuvre utilisé

I.3.1.2 les renforts

On les appelle aussi armature, squelette ou renforts, les matériaux sont souvent plus résistants lorsqu'ils sont sous forme de fibre de faible diamètre.

Le renfort est généralement composé de matériau plus dur que la résine, il est donc renforcé avec des fibres naturelles, qui a attiré l'attention des chercheurs parce qu'ils pourraient être une solution efficace pour résoudre les problèmes d'environnement, de biodégradabilité et d'épuisement du pétrole, tout en développant des composites à moindre prix [6, 7].

Les fibres sont généralement des filaments de diamètre $7\mu\text{m}$ en moyenne pour le filament de carbone, $20\mu\text{m}$ pour le verre. Souvent fabriqué sous une forme continue, ils peuvent être coupé et assemblés de plusieurs façons pour constituer différents semi-produit 'Préforme' son rôle principal est d'assurer les caractéristiques mécaniques élevées comme : la rigidité, la résistance à la rupture, dureté, etc.

Ces renforts permettent également d'améliorer certaines caractéristiques physiques : comportement thermique, propriété électrique, résistance à l'abrasion etc.

Les renforts fibres se présentent généralement, sous diverses formes :

1.3.1.3 Fibre courte :

Elles sont utilisées, avec les thermoplastiques, pour les pièces de petite taille moulées par injection et aux caractéristiques mécaniques réduites avec les thermodurcissables, elles sont utilisées pour des températures supérieures à 150°C . La rigidité des matériaux à fibres discontinues sera en générale plus faible que celle des composites unidirectionnels. D'un autre côté, les composites renforcés de fibres courtes peuvent être plus facilement mis en œuvre que leurs homologues à fibres continues. La production rapide de pièces de géométrie complexe est possible.

1.3.1.4 Fibre longue :

Associées à une matrice époxy, les fibres longues sont réservées aux pièces nécessitant des performances élevées Associées à une matrice polyester, elles sont réservées aux pièces de grande diffusion. L'arrangement des fibres peut être plan ou volumique avec des fibres alignées ou distribuées aléatoirement selon la direction voulue :

- unidirectionnelles : toutes Les fibres vont avoir la même direction.
- bidirectionnel : les fibres vont avoir deux directions distinctes.

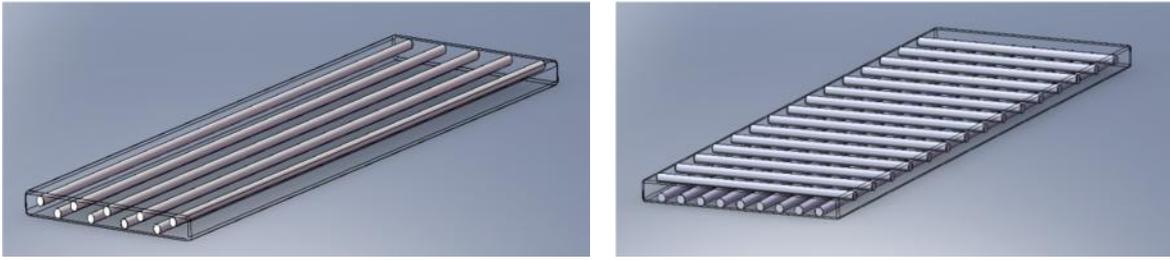


Figure I.2.Matériau composite à fibre unidirectionnelle et bidirectionnelle.

En fonction de la forme des renforts, nous y distinguons trois catégories principales : les composites renforcés par des particules, les composites renforcés par des fibres et les composites structuraux. Chacune de ces catégories se divise en au moins deux sous-catégories. [8].

1.3.2 Les matrice

La matrice est l'une des deux principaux constituants des matériaux composites. C'est le terme désignant la résine polymérisée dont le rôle est de maintenir les renforts en place et de leur assurer la cohésion et la protection. Elle permet également la transmission des efforts mécaniques vers les renforts. La matrice est généralement homogène et isotrope ; on distingue les matrices céramiques, les matrices métalliques, les matrices minérales et les matrices organiques

Les matrices organiques se subdivisent généralement en deux grandes catégories :

- Les matrices thermoplastiques,
- Les matrices thermodurcissables

1.3.2.1 Les thermoplastiques :

Présentent une structure moléculaire linéaire ou ramifiée dont les liaisons de type Van der Waals sont de faible niveau énergétique. Ils possèdent ainsi théoriquement la propriété de pouvoir être mis en forme plusieurs fois par chauffage et refroidissement successifs, se

ramollissant à la chaleur sans se déstructurer. Cette qualité rend les thermoplastiques potentiellement recyclables [9], mais limitée par leur difficulté de mise en œuvre en raison de leur viscosité et température élevées.

Les thermoplastiques étaient généralement renforcés par des fibres courtes par injection ou extrusion mais des techniques de formage de plaques ont permis de mettre en forme des thermoplastiques avec des renforts fibreux longs, aussi les principales résines thermoplastiques utilisées pour les composites de grande diffusion.

Les thermoplastiques de haute performance ont été développés pour améliorer la tenue en température des composites [10].

Les thermoplastiques ont en général une bonne résistance à l'impact, ils peuvent être amorphes ou semi-cristallins, dont amorphes n'ont pas un ordre établi dans la structure moléculaire qui les compose. Ils possèdent ainsi une seule transition thermique caractéristique, et les thermoplastiques semi-cristallins ont, quant à eux, une phase amorphe (disposition aléatoire des molécules) et une phase cristalline (état ordonné dans lequel les molécules sont réparties de façon périodique en proportion variable [10].

1.3.2.2 Les thermodurcissables :

Les matrices thermodurcissables représentent plus des trois quarts du marché européen. Elles sont principalement appréciées pour leur faible viscosité à l'origine d'une bonne imprégnation des renforts et leur faible température de mise en œuvre [10]. Contrairement aux matrices thermoplastiques, les matrices thermodurcissables ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois, leur structure tridimensionnelle présente généralement des propriétés thermomécaniques (rigidité, résistance) et chimiques plus élevées que celles relatives aux matrices thermoplastiques.

Ces polymères se présentent toujours sous forme amorphe. Ils sont donc caractérisés uniquement par leur température de transition vitreuse et n'ont pas de température de fusion [10]

Le procédé de mise en forme des résines thermodurcissables est essentiellement le moulage qui peut être fait par coulée ou par compression.

I.4 Procédé de mise en œuvre des matériaux composites

L'élaboration d'un matériau composite consiste en trois opérations indispensables qui sont : - Imprégnation du renfort par le système résineux. - Mise en forme à la géométrie de la pièce. - Durcissement du système :

- Soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
- Soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Le moulage reste le procédé le plus utilisé dans l'élaboration de matériaux composites, mais Il existe d'autres procédés aussi importants :

I.4.1 Moulage au contact

Le principe consiste à imprégner manuellement les renforts disposés dans un moule. Cette technologie est plus réservée à la réalisation de pièces prototypes ou de simulation [3].

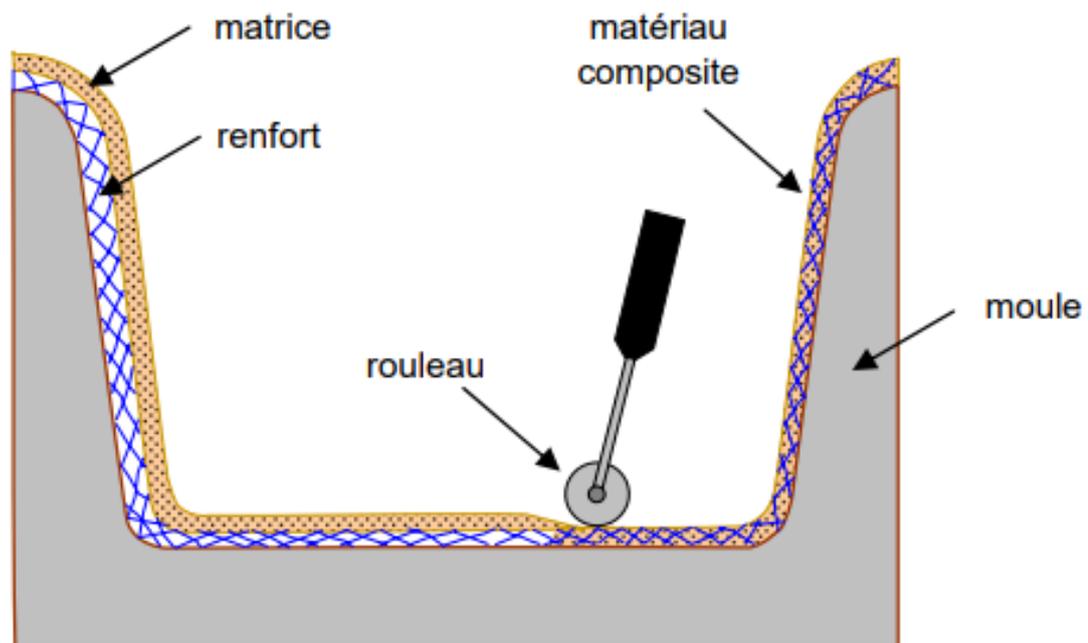


Figure I.3.Principe du moulage au contact [3].

Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes :

1. Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau.
2. Le renfort : mat, tissu, etc., est disposé dans le moule. Divers types de renforts peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer.
3. Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un ébullage est effectué avec un rouleau cannelé.
4. Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique.

Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, armatures, etc.

5. Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures).
6. La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage (par exemple 5 à 10 heures, aux environs de 80 °C).
7. Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc.

I.4.2 Moulage par projection simultanée

C'est une technologie similaire à la précédente mais le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule.

L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifier et d'un pistolet projetant de la résine et les fibres coupée [3].

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient. Le renfort est toutefois limité à des fibres coupées, et les caractéristiques mécaniques du matériau restent moyennes.

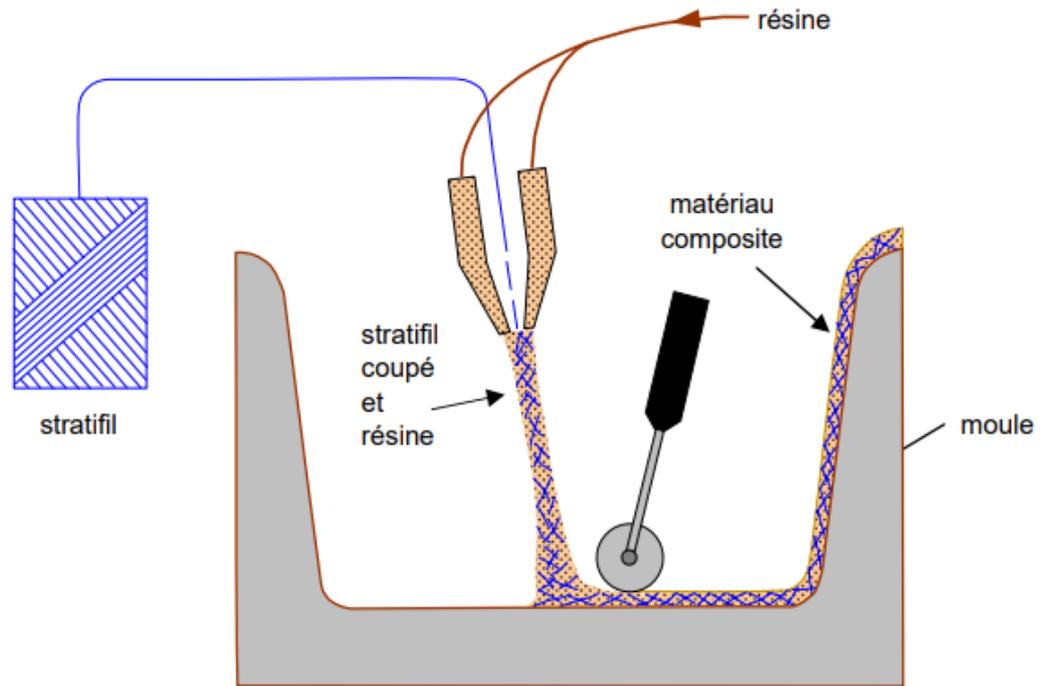


Figure I.4. Principe du moulage par projection simultanée [3].

I.4.3 Moulage par injection

Le moulage par injection est la technique la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des thermoplastiques armés.

Procédé discontinu haute pression, alimentation et dosage du Compound, Injection-pression, maintien et polymérisation, puis éjection.

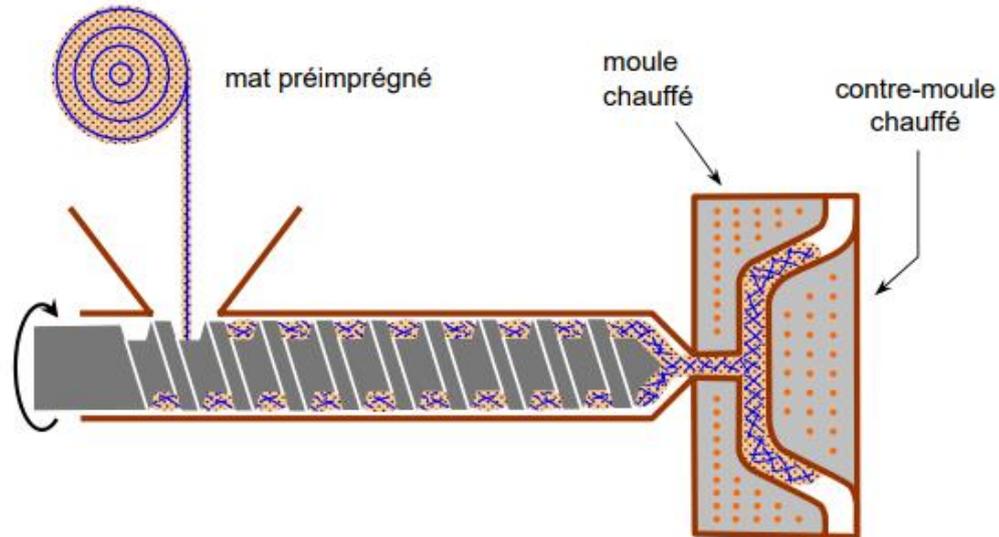


Figure I.5.Principe du moulage par injection [3].

I.4.4 Pultrusion

Ce procédé sert pour la fabrication a profils, rectiligne, ou courbe a section constante, hautement renforcée dans la direction principale [3].

Utilisation pour les composites hautes performances industrielles. Le principe est : tirage, mise en forme et polymérisation de fibres continues imprégnées. Les avantages sont la production en continue, possibilité de réaliser des sections très complexes, et d'avoir un taux de renfort élevé.

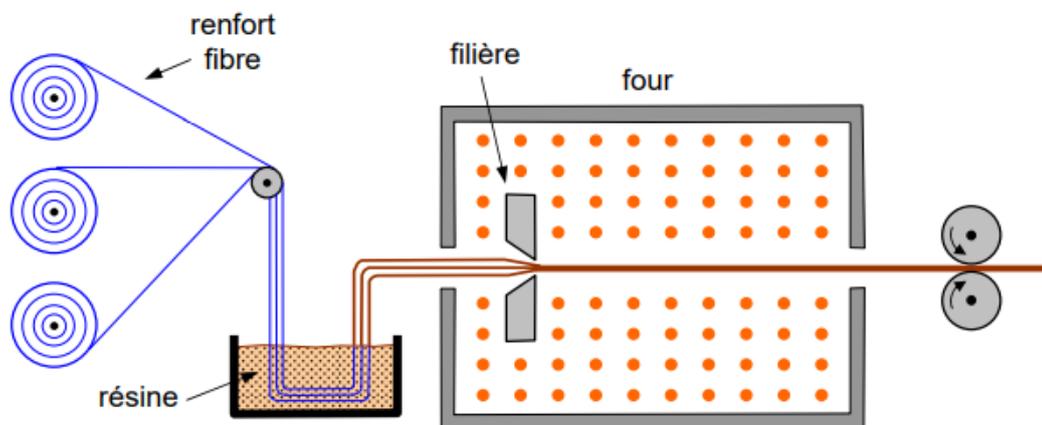


Figure I.6.Principe du moulage par pultrusion.

I.4.5 Moulage par enroulement filamentaire

Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces sphériques et cylindriques et permet une conception avancée des pièces. Les stratifiés obtenus peuvent comporter des proportions élevées des renforts permettant alors d'obtenir de hautes caractéristiques mécaniques [3].

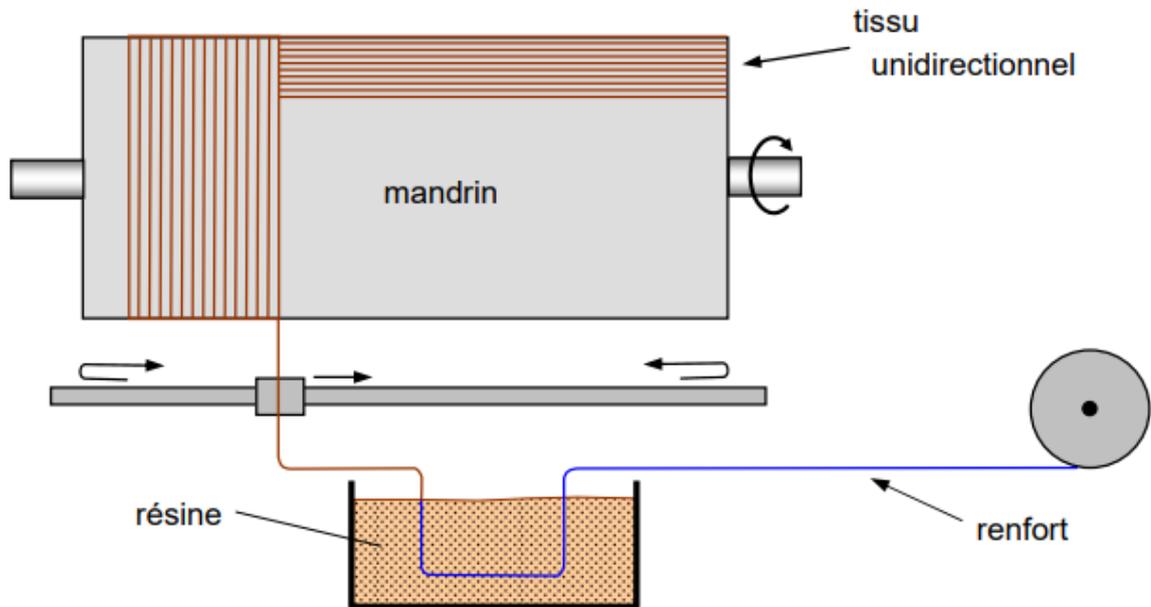


Figure I.7. Principe du moulage de l'enroulement circonférentiel.

I.5 Application des matériaux composite

Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien (civil et militaire), maritime et ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs, notamment grâce à leur bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier et leur faible masse volumique. Les fibres de verre sont utilisées notamment dans la fabrication de pièces industrielles, de piscines, de pièces pour bateaux, d'éléments automobiles, de transports, et agricoles, de supports publicitaires, ou pour quelques pièces ou objets de décoration et d'ameublement.

Le marché américain des composites par application en 2000, similaire au marché mondial durant la même période, est illustré à la Figure I.8.

Cependant, nombre de secteurs d'activités demeurent à explorer quant à l'usage des matériaux composites et leurs valeurs intrinsèques, à cause de ses avantages, la légèreté, facilité de mise en œuvre et de découpe.

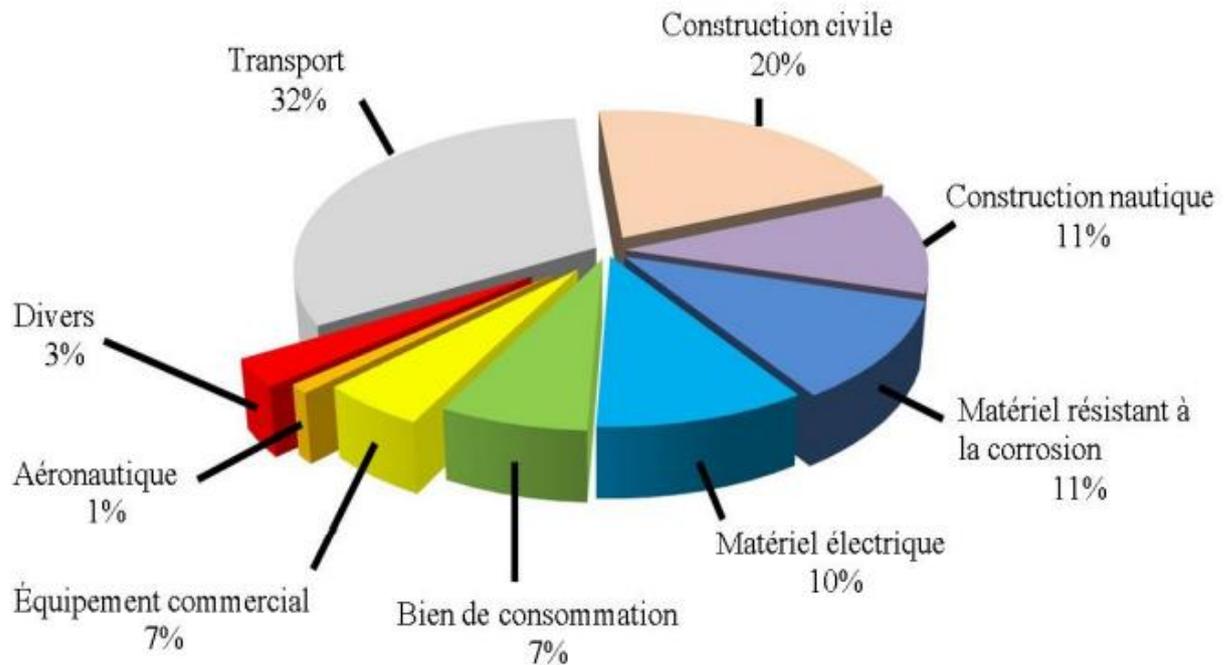


Figure I.8. Le marché mondial des composite par application en 2000.

I.6 Etat de l'art

Dans cette étude de **Makhlouf et al** ; des biocomposites de fibres PEHD/lin dans différentes formulations et leurs propriétés de traction, de flexion en 3 points et morphologiques ont été développés et largement caractérisés. La liaison inter faciale dans les échantillons biocomposites fracturés a été examinée par microscope électronique à balayage (MEB).

Alors que le comportement thermique de ces nouveaux biocomposites PEHD/lin a été étudié à l'aide de DSC et d'ATG. Le ratio de renfort testé en poids varie de 5% à 20% de fibre de lin naturel avec différentes vitesses de chauffage, à savoir 5°C/min, 10°C/min et 20°C/min. Les résultats pour les propriétés mécaniques obtenues telles que la résistance à la traction et à la flexion ont révélé une augmentation de 24 à 35 MPa et de 15,82 à 19,72 MPa, respectivement, par rapport au PEHD pur. D'autre part, les essais thermiques ont révélé que la

vitesse de chauffage a un effet prononcé sur le comportement thermique des matériaux étudiés en déplaçant la plage de dégradation des biocomposites vers les hautes températures.

Les fibres de lin (FF) ont un diamètre approximatif de 18 μ m et une longueur de 0,8 à 1 m, ont les sèches à 90°C pendant 30 h puis stockés dans un récipient scellés. Le polymère utilisé comme matrice est le polypropylène (PEHD) référence PPC 10642, les matériaux composites sont produits en trois étapes. Les matières premières sont mélangées par extrusion, puis pastillées et moulées par injection. Les fibres coupées sont laissées à la vapeur pendant 24 heures à une température de 50°C avant d'être mélangées avec le PEHD par extrusion.

L'extrusion est réalisée à l'aide d'une extrudeuse mono vis à une vitesse de 20 rpm. La température de la vis et filière est de 190°C. Les fibres sont ajoutées jusqu'à 20% en masse.

Les granulés extrudés sont cuits à la vapeur pendant 24 heures à 50°C avant le moulage par injection. Les éprouvettes de traction sont injectées à 190°C dans une presse BATTENFELD équipée d'un moule permettant de réaliser des éprouvettes de type altéré selon la norme ISO 527-2. La température du moule est de 30°C. Le temps entre l'introduction des granulés et la libération de la pièce, est de 300 s. Les composites produits sont regroupés dans le tableau 1.

Tableau I.1. Composition et désignation des quatre formulations différentes de biocomposites PEHD/lin.

Désignations	Biocomposites
PEHD pur	Polyéthylène haute densité soigné
PEHD /5%FF	Biocomposites Polyéthylène Haute Densité avec 5% de lin en masse
PEHD/10% FF	Biocomposites Polyéthylène Haute Densité avec 10% de lin en masse
PEHD/20%FF	Biocomposites Polyéthylène Haute Densité avec 15% de lin en masse

Les observations des morphologies de surface du lin et des biocomposites ont été faites sur un appareil en mode topographique, comme le montre la figure I.9. La surface de la fibre a été recouverte par pulvérisation cathodique avant le balayage pour éviter effets de charge du faisceau d'électrons pendant l'examen. La tension d'accélération électronique retenue est de 5 kV afin d'éviter tout risque de dégradation des échantillons.

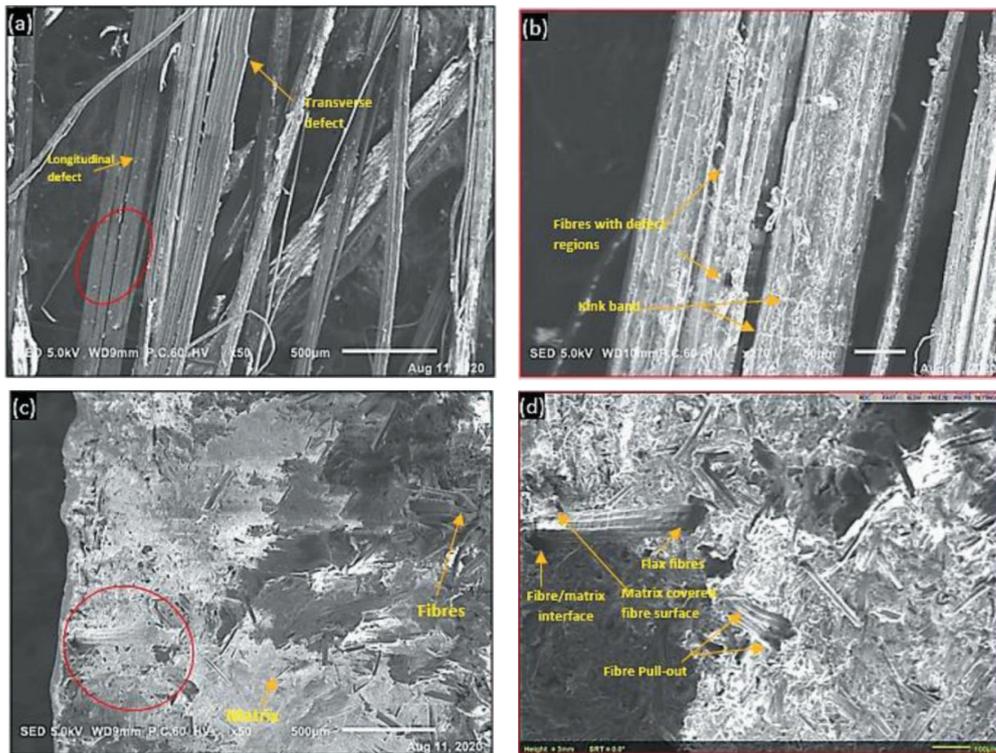


Figure I.9. Micrographies SEM de (a, b) fibres de lin et (c, d) caractéristiques de défaillance du biocomposite PEHD/Flax. Matrix dans la section transversale.

Des essais de traction statique et de flexion trois points sont effectués sur une machine d'essai universelle, équipé d'un capteur de force de 5 kN.

Contrôle de la machine et acquisition de données Se fait par ordinateur. L'essai de traction a été effectué avec une vitesse de chargement de 1 mm/min. D'autre part, l'essai de flexion trois points est effectué sur une éprouvette parallélépipédique, la distance (L) entre les deux points d'appui de l'éprouvette est de 60 mm. La vitesse de traverse se déplace à une vitesse de 1 mm/min tout au long de l'essai jusqu'à ce que l'éprouvette se rompe.

Tous les tests sont faits à température ambiante de 23°C et l'humidité relative est d'environ 40%. Efforts et valeurs s'enregistre simultanément le mouvement du faisceau mobile.

Caractérisation mécanique des biocomposites HDPE/lin par L'analyse des résultats des essais mécaniques de traction et de flexion en trois points avec une vitesse de charge de 1

mm/min montre que la contrainte de traction moyenne (σ) est de $31,02 \pm 2,02$ MPa ce, ce qui correspond au module d'élasticité. (E) $6,71 \pm 0,261$ GPa de biocomposite chargé à 20 % (HDPE / 20 % FF).

Ces résultats représentent une augmentation d'environ 24 % (pour σ) et une diminution de 3 % (pour E) par rapport au HDPE / 5 % FF. En revanche, l'augmentation est de l'ordre de 77% et 494%, respectivement, par rapport au PEHD pur.

De plus, une analyse des résultats obtenus au test de flexion 3 points montre que le biocomposite HDPE/10%FF a le meilleur comportement avec une valeur moyenne de la contrainte de flexion (σ_f) et du module de flexion, respectivement, à ce dernier est une augmentation de 24,18 % (pour σ_f) et de 70,93 % (pour E_f) par rapport à la formulation HDPE/5 % FF. Aussi, des augmentations de l'ordre de 82% et 186% par rapport au PEHD pur, respectivement, pour les mêmes propriétés.

Donc la cause de la diffusion observée au module d'Young peut être liée à la forte anisotropie et à la répartition non uniforme des fibres dans la matrice, qui est un facteur incontrôlable en raison de la structure fine des fibres. La variabilité des valeurs de contraintes peut être directement liée à la présence de vides dans la matrice. En effet, si la force de cohésion entre la matrice et la fibre naturelle est faible, la fibre se séparera de la matrice polymère (la fibre se déchirera) et ne cassera pas sous forte charge sur l'échantillon.

Ceci implique que l'interface polymères/fibres végétales ne permet pas à la matrice polymère d'exploiter tout le potentiel des fibres.

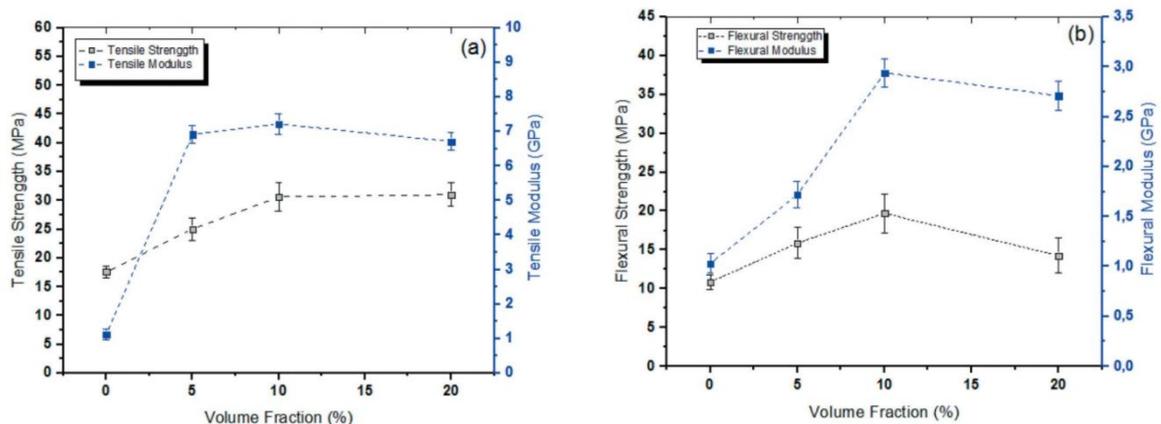


Figure I.10. Propriétés mécaniques des biocomposites HDPE/lin avec différentes fractions volumiques : (a) propriétés de traction et (b) propriétés de flexion.

Cette étude a permis de conclure :

Les propriétés mécaniques (contrainte et déformation à la rupture et module d'élasticité) du matériau varient en fonction du taux de chargement des fibres

Dans cette étude **LEI, Bo et al** ; Les plastiques traditionnels d'origine fossile sont souvent critiqués, surtout pour des applications à courte durée de vie. La quantité de matières résiduelles qu'ils génèrent, leur caractère non biodégradable et leur matière première d'origine fossile sont parmi les critiques formulées à leur égard.

Les bioplastiques connaissent un engouement depuis quelques années et ils sont présentés comme des solutions de rechange plus respectueux de l'environnement. Ils sont souvent biodégradables et issus de ressources renouvelables, deux caractéristiques utilisées comme arguments promotionnels.

Les fibres lignocellulosiques peuvent être produites à partir de matières végétales naturelles par réduction en pâte mécanique ou prétraitement par explosion à la vapeur. Cependant, la réduction en pâte mécanique implique généralement plusieurs étapes de raffinage étapes coûteuses et très énergivores.

La fibre lignocellulosique renouvelable est très abondante, a attiré depuis des années l'attention de plusieurs équipes de recherche à travers le monde pour des applications industrielles diverses.

Cette étude visait à développer une stratégie de préparation facile de matériaux bio sources thermoplastiques en utilisant la fibre de sisal comme matière première lignocellulosique.

Les SF ont été prétraitées par CSE, ensuite ils ont été compactés par la vis et progressivement chauffé par frottement et déchargé de la filière.

Pour l'oxydation les fibres passent par deux types d'agitations manuelles et magnétiques ensuite une filtration pour éliminer les composés contenant de l'iode.

Les fibres oxydées ont été réduite par du brohydrure de sodium. Les fibres modifiées issues des étapes précédentes ont été étiquetées comme OSF-n/OSESF-n et RSF-n/RSESF-n, respectivement et elles subissent un échauffement dans un moule en acier allié en 150°C pendant 5 min. L'échantillon et ensuite a été refroidi à température ambiante en déterminant une cristallinité par diffraction des rayons X à grand angle.

Les morphologies des fibres modifiées et des feuilles moulées ont été imagées par un système de microscopie électronique à balayage. Les analyseurs DMA 242 et 209F3 ont été utilisés pour déterminer l'analyse mécanique dynamique des fibres et thermiques.

Le prétraitement CSE a un effet significatif sur la défibrillation des matières premières lignocellulosiques car il provoque une destruction de leurs structures tissulaires en obtenant des SF exposés à la vapeur (SESF) (Figure I.11).

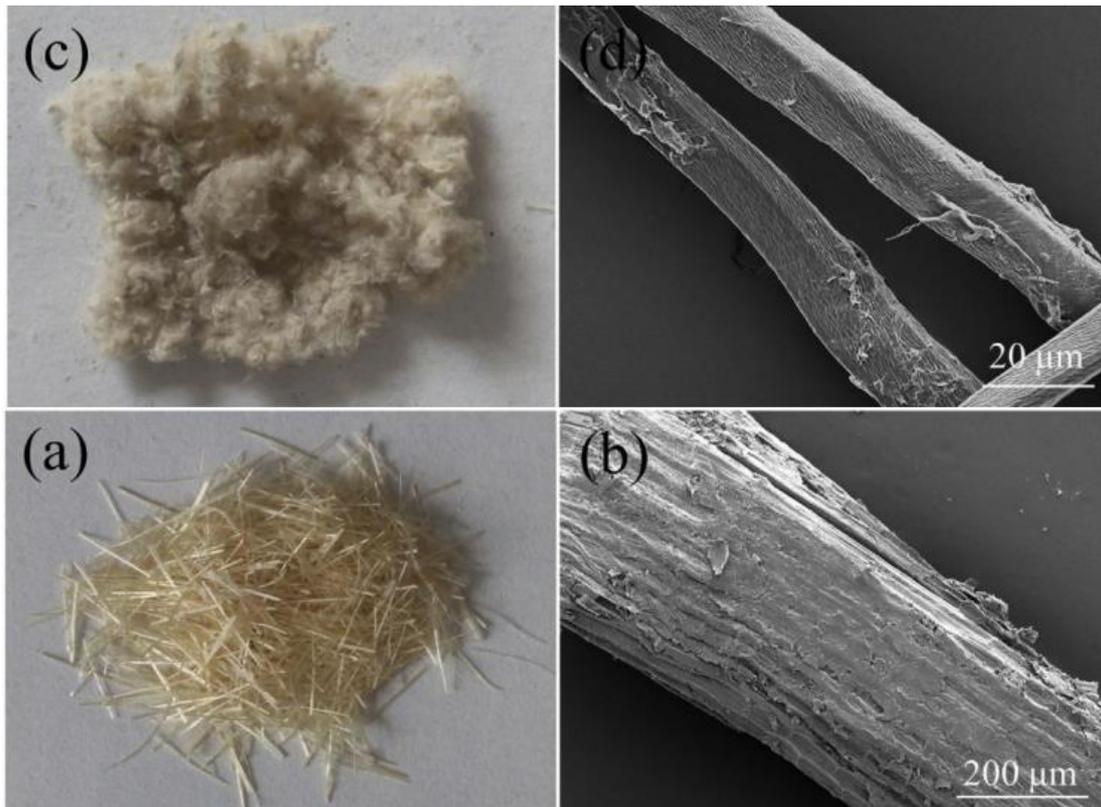


Figure I.11. Photographies de (a) SF et (c) SESF; et images SEM de (b) SF et (d) SESF.

En raison de l'oxydation de la cellulose et de l'hémicellulose par le periodate, le degré d'oxydation des fibres lignocellulosiques était difficile à calculer avec précision. Les teneurs en dialdéhyde d'OSF et d'OSF, ainsi que les rendements d'OSF, d'OSF, de RSF et de RSESF, sont présentés de manière préliminaire à (figure 12) pour indiquer les modifications des fibres lignocellulosiques.

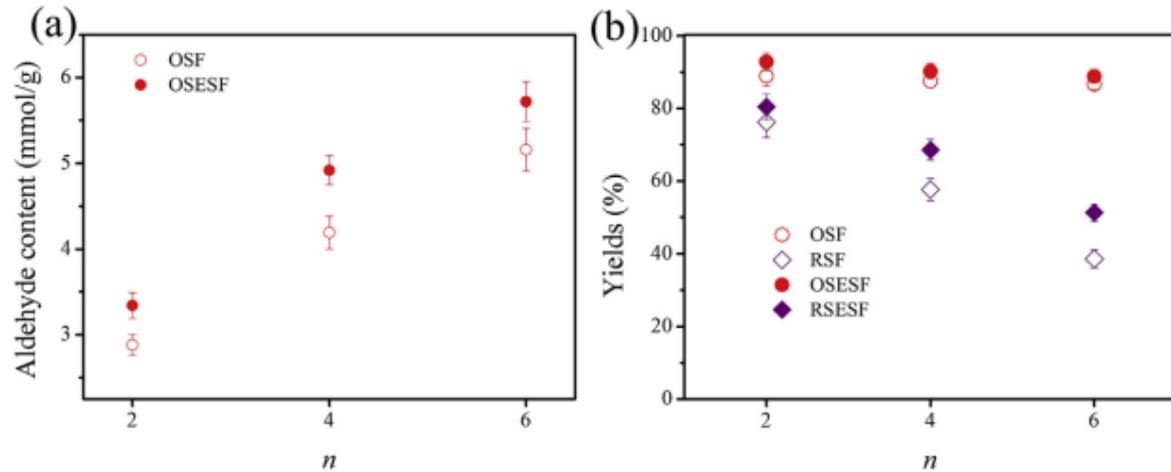
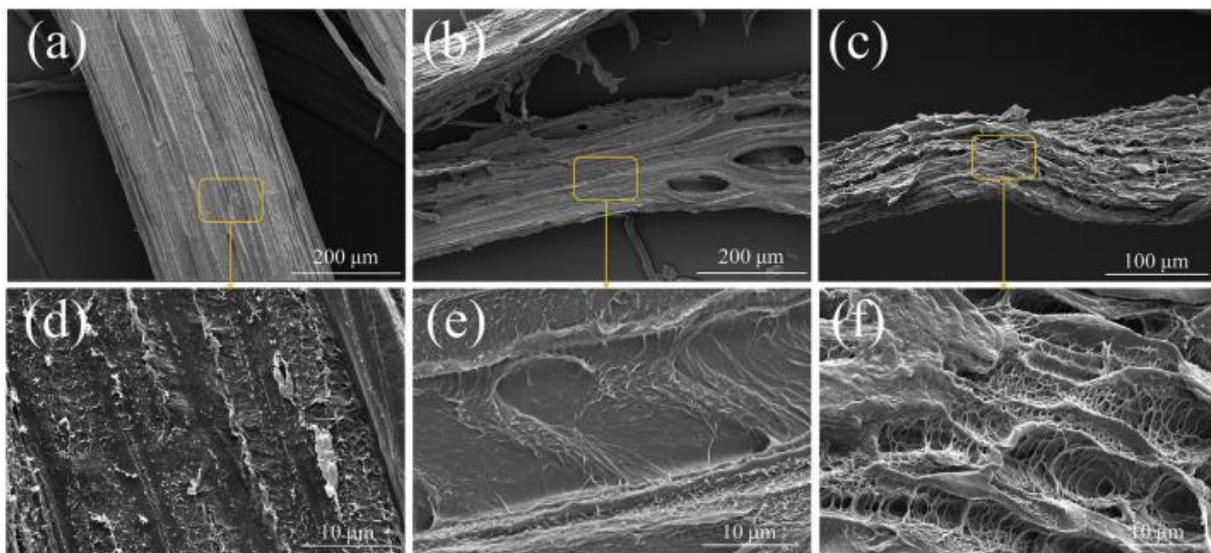


Figure I.12. (a) Teneur en aldéhyde dans les fibres oxydées (b) rendements en fibres oxydées et en fibres oxydées/réduites.

Les rendements des produits modifiés sont des paramètres importants pour évaluer cette stratégie, et sont significativement affectés par le periodate dosage. Dans cette étude, le rendement de 70% des produits modifiés de SESF à $n = 4$ indique que la plupart des ressources lignocellulosiques ont été utilisées.

De grandes différences étaient observées entre les morphologies RSF et RSESF avec n croissantes valeurs. La surface RSF est devenue rugueuse et poreuse (def), En revanche, la surface RSESF est devenue lisse (jel) ; Figure I.13)



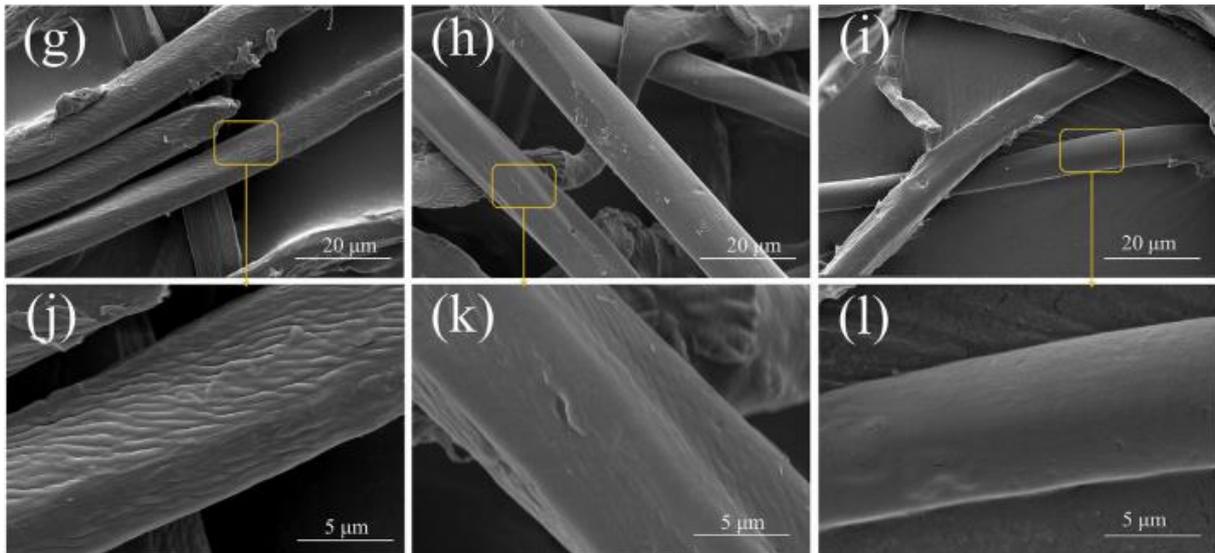


Figure I.13. Images SEM de RSF et RSESF: (a) RSF-2, (b) RSF-4, (c) RSF-6; (g) RSESF-2, (h) RSESF-4, (i) RSESF-6; (j) et (k) montrent des versions agrandies des régions marquées de cases jaunes.

Les modifications de la structure chimique produites par le periodate l'oxydation et la réduction du borohydrure ont été examinées par FTIR spectroscopie et Les spectres XPS des fibres oxydées/réduites montrent que le produit polysaccharidique partiel exposé sur la surface SESF (couche S2) après CSE était plus facile à modifier en raison de la réactivité élevée et pouvait se perdre après oxydation / réduction et exposition à la lignine dans la paroi secondaire. L'intensité C1 de RSESF a légèrement diminué lorsque n a augmenté à 6, ce qui a été attribué à la rupture des liaisons CeC.

Les structures cristallines des fibres modifiées ont été évaluées par WAXD. Le CrI de SESF était beaucoup plus élevé que celui de SF pour deux raisons :

- L'hémicellulose amorphe, la lignine et la pectine ont été partiellement dégradées et éliminées lors du prétraitement CSE.
- un réarrangement et une cristallisation de la chaîne se sont également produits et augmenter la taille des cristallites pendant le prétraitement CSE.

Le CrI mesuré de RSF était inférieur à celui de RSESF, ce qui pourrait également être attribué à des différences dans la perturbation de la structure cristalline.

Les données des essais mécaniques sont présentées à la (Figure. I.14), Les propriétés mécaniques améliorées ont été attribuées à la ductilité et à la flexibilité accrues de la cellulose de dialcool amorphe lorsque n augmentait.

Ces résultats étaient favorables au traitement thermoplastique des fibres modifiées et à la formation d'une liaison d'interface fondue entre les fibres à haute pression et température.

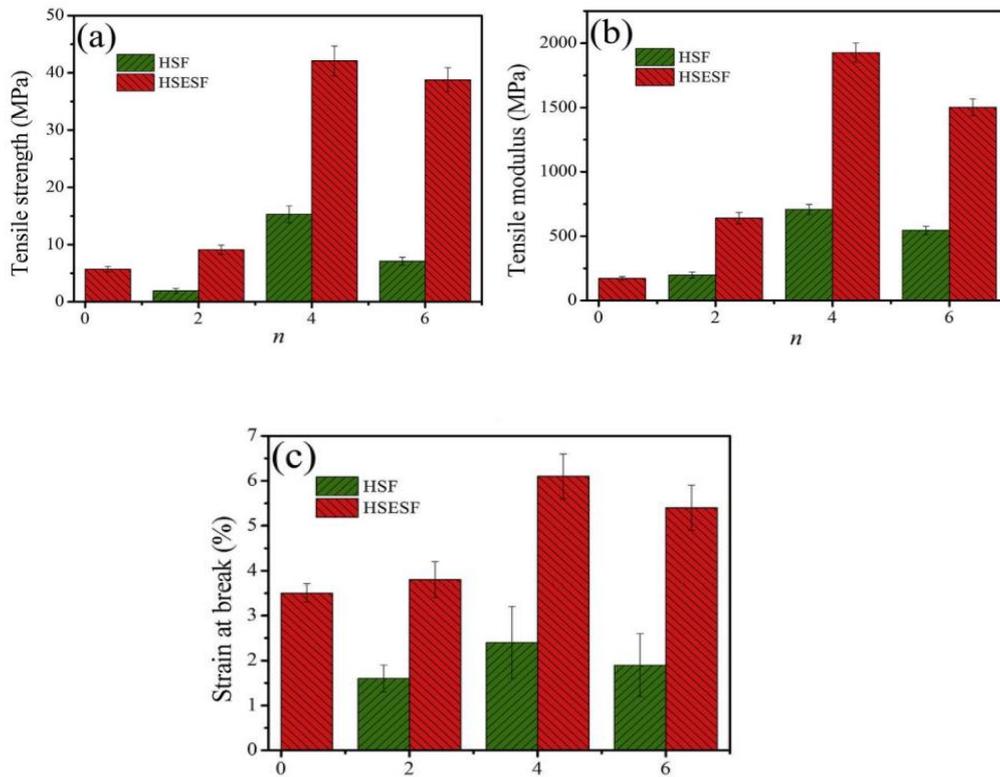


Figure I.14. Propriétés mécaniques du HSF et du HSESF à différents niveaux d'oxydation

Les courbes DMA tan d de HSF et HSESF sur la figure I.15 montrent les valeurs de T_g des fibres modifiées. Ces courbes avaient deux pics, indiquant deux processus de relaxation. La T_g de la lignine est généralement supérieure à celle de la plupart des polymères thermoplastiques traditionnels, ce qui entraîne une augmentation de la T_g lors de la préparation de composites lignine/polymère car le mouvement des segments moléculaires polymères était limité par la structure de réseau rigide de la lignine.

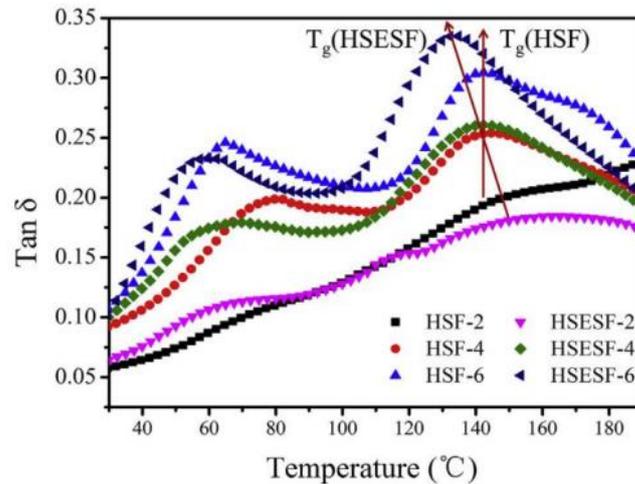


Figure I.15. Analyse DMA de HSF et HSESF : Tan d en fonction de la température.

Notamment, le mécanisme de modification a déterminé le processus de préparation, y compris le prétraitement, l'utilisation des réactifs, le système et l'état de la réaction, et les rejets.

Plus important encore, la réaction d'ouverture de cycle a entraîné un changement d'état de valence plutôt que les consommations de réactifs, ce qui signifie que ces réactifs peuvent être régénéré et recyclé. Admirablement, beaucoup d'efforts se sont concentrés sur atteindre ces objectifs grâce à une stratégie réalisable et respectueuse de l'environnement qui est vital pour résoudre les problèmes de rejets et préparer un bioplastique rentable.

Cependant, les matériaux issus de cette stratégie présentaient un inconvénient majeur, à savoir la sensibilité à l'eau, qui entraînait des propriétés mécaniques réduites dans un environnement à forte humidité. Par conséquent, un traitement imperméable de surface est nécessaire pour leur application pratique

Dans cette étude **BELHANECHÉ et al** ; le projet soumis vise à élaborer et caractériser de nouveaux matériaux composites à base de mélanges de polymères thermoplastiques conventionnels (PE, PVC) et biodégradables (PLA) renforcés par des fibres végétales (fibres de jute ou sciure de bois).

Les considérations environnementales sont prises en compte dans la mise en œuvre de ces nouveaux matériaux par l'utilisation de constituants biodégradables et bio-sourcés, de déchets de polymères conventionnels et de fibres végétales.

Les fibres végétales considérées constituent une matière abondante et biodégradable. Elles présentent une résistance élevée à la traction et à l'abrasion et sont plus souples que les fibres de verre habituellement utilisées comme renfort. Leur densité plus faible permet au matériau un gain de poids. Dans une optique de développement durable, la comparaison des données énergétiques et des émissions de gaz (CO₂, NO_x, SO_x) de la production de fibre de verre et végétale sont nettement en faveur de cette dernière. La présence d'usines de jute et d'industries du bois en Algérie nous permettra de disposer de fibres de jute et de sciures de bois issues des rebuts de fabrication en quantités suffisantes.

L'étude de la caractérisation et de la modification éventuelle de la surface des fibres afin d'optimiser les interfaces fibre-matrice est envisagée. Une analyse des propriétés physiques (densité, indice de fluidité), thermiques (DSC, ATG), structurales (spectroscopie FTIR), morphologique (analyse microscopique) et mécaniques (essai de traction, dureté, résistance au choc) des composites préparés sera effectuée.

Des essais de vieillissement hygrothermique, photochimique et dans le sol seront réalisés en effectuant des prélèvements qui seront caractérisés afin de tester le comportement de ces nouveaux matériaux dans un environnement naturel.

I.7 Conclusion

D'après la modeste étude bibliographique élaboré dans ce travail les principales conclusions sont comme suit :

- Les matériaux composites sont des matériaux qui connaissent un immense succès en matière de leur fabrication et leur utilisation dans divers secteurs industriels.
- Dans ce chapitre, nous avons donné la description de différents matériaux composites, leurs constituants, ainsi que les techniques utilisées pour leurs élaborations.

CHAPITRE II:

**ÉLABORATION ET CARACTERISATION DES
MATIEUX COMPOSITES**

II. 1. INTRODUCTION

Le présent chapitre résume les travaux effectués afin d'étudier l'évolution des propriétés mécaniques des biocomposite a renforts en fibres naturelles et synthétique. Le but de notre travail est l'élaboration et la caractérisation des biocomposites a matrice thermoplastique a renfort en fibre de palmier dattier.

La préparation des matériaux passe par les étapes illustrées dans le schéma présenté ci- dessous qui explique l'ordre logique dans lequel se déroulent ces étapes, les méthodes expérimentales utilisées dans cette étude et la description détaillée de chacune de ces étapes sont expliquée dans ce chapitre.

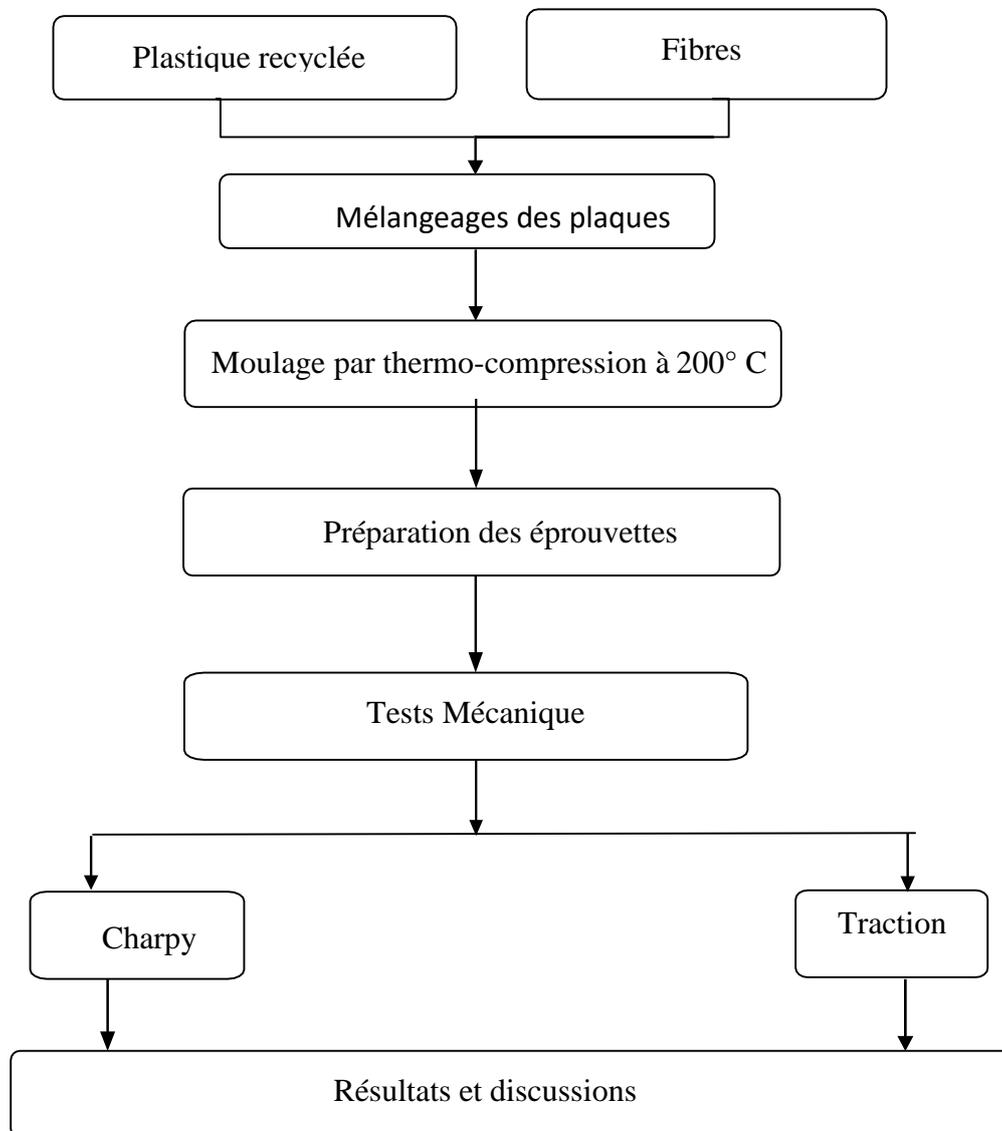


Figure II.10.les différentes étapes d'élaboration et de caractérisation de matériaux biocomposite

II.2 Constituants des composites élaboré

Dans ce travail lors de l'élaboration des différents types de bio composites on a utilisé des grains de plastique recyclé comme matrice thermoplastique et des fibres végétales qui sont issues de palmier dattier et aussi un tissu de fibre de verre.

II.2.1 Matrice

La matrice utilisé dans ce travail lors l'élaboration des composite est à base de plastiqué recyclé sous forme granulaire multicolore, comme l'indique la figure ci-dessous.



Figure II.2. Plastique recyclé sous forme de granula.

II.2.2 Renfort

Les renforts utilisés dans ce travail proviennent des fibres de verre sous forme d'un tissu bidirectionnelle de densité surfacique de 500 g/m^2 (Figure 3), ainsi que les fibres de palmier dattier du tronc appelé encore les fibres de mesh possédant une structure fibreuse sous forme d'un tissu bidirectionnelle (Figure 4).

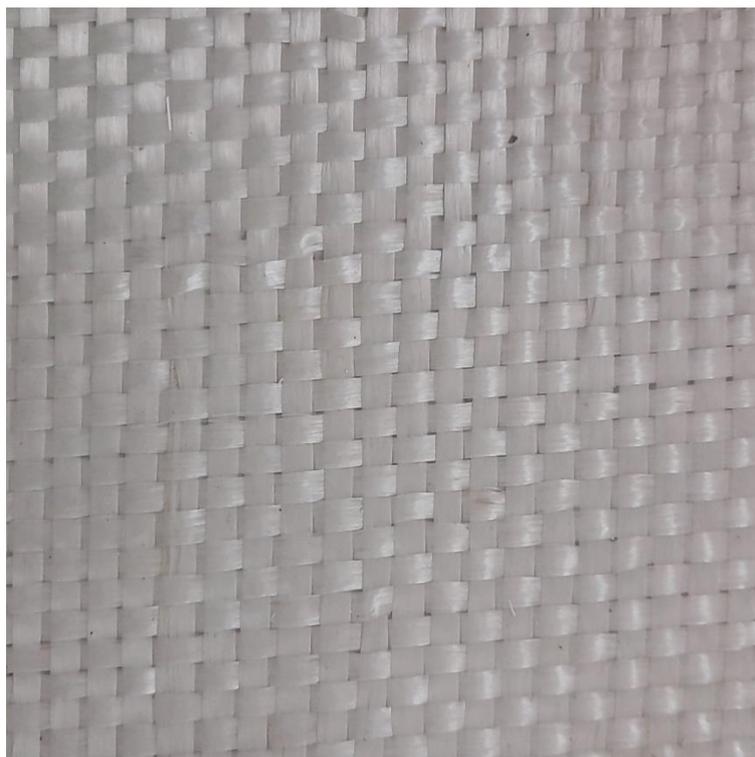


Figure II.3. Tissu bidirectionnel de fibres de verre.



Figure II.4. Fibre de palmier dattier (Mesh).

II.3 Elaboration des plaques composites

L'élaboration des matériaux composites est une étape importante par son influence sur les propriétés du produit fini. En effet, le procédé et les paramètres de mise en œuvre sont déterminants vis à vis des performances recherchées du composite.

La technique d'élaboration utilisée dans ce travail est une méthode classique bien adaptée pour la mise en forme des mélanges à matrice thermoplastique par l'utilisation d'une presse à chaud.

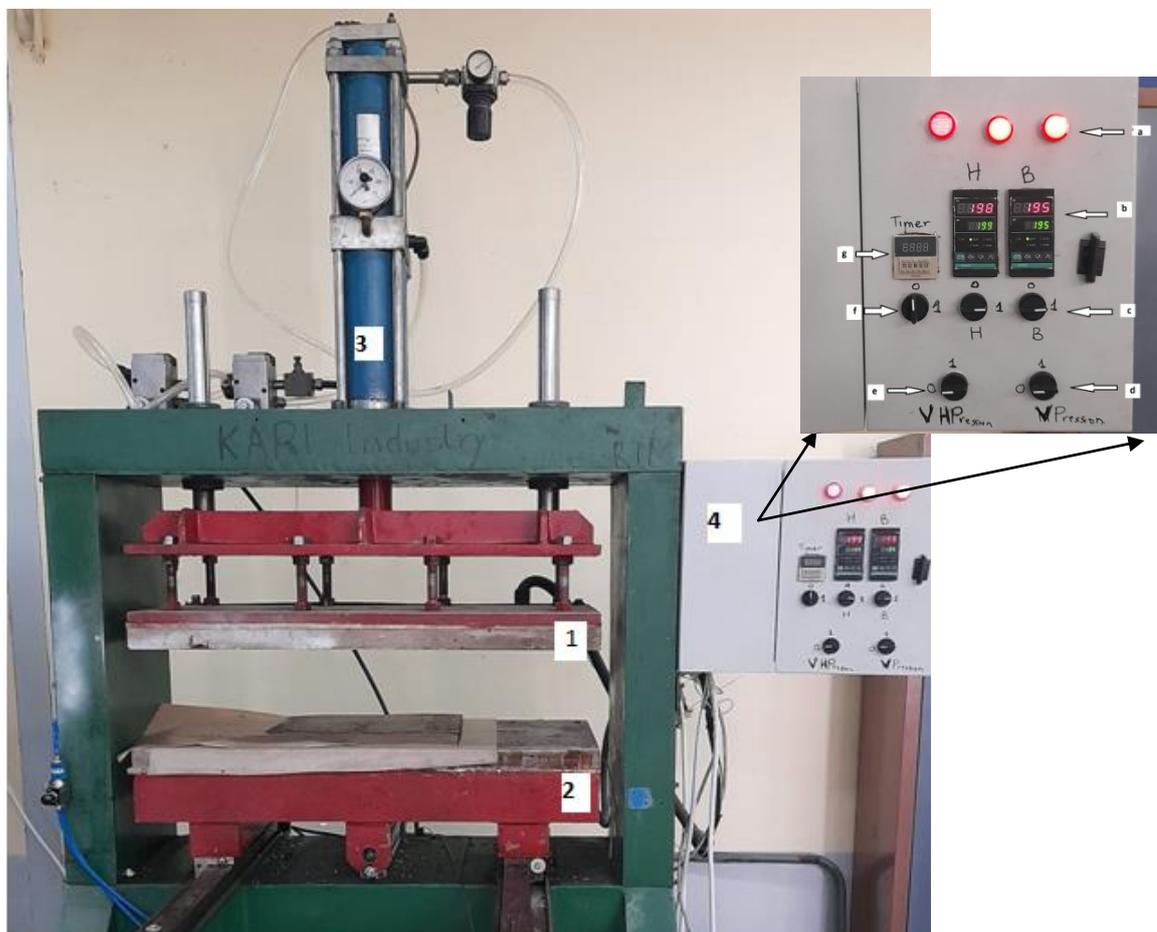


Figure II.5. Presse hydraulique à chaud.

Nomenclature :

- 1- Plaque chauffante supérieur

- 2- Plaque chauffante inferieur
- 3- Vérin hydraulique
- 4- Boite à commande :
 - a) témoin lumineux, b) indicateur de température des plaques chauffante supérieure et inférieure, c) boutons d'allumage de la résistance des plaques supérieure et inférieure, d) bouton pour faible pression (pression normale), e) bouton pour haute pression, f) bouton pour activer le timer, g) afficheur digital du timer.

II.3.1 Elaboration des plaques plastique

Production des plaques plastique de 2 à 3 mm d'épaisseur à l'aide d'une presse hydraulique par thermocompression à plateaux pour avoir des plaques carrées 30 x 30 (cm²) (Figure II.6).

La fabrication d'une plaque a base de plastique recyclé sous forme de granula se déroule selon les étapes suivantes (Figure II.6) :

- Après avoir allumé la machine et le réglage de la température de chauffage à 200 °C des plaques supérieure et inférieure, la matière plastique recyclée est pesé avec une balance de précision de 0,1 gramme ;
- Mise d'un papier téflon sur la plaque chauffante inférieure afin d'évité toute sorte d'adhésion de la matière plastique sur cette plaque lord de son échauffement ;
- Mise d'un moule métallique sur le téflon ;
- Dispersion des granula pesé dans le moule entre deux papiers de téflon ;
- Mise d'un papier téflon sur les granula ;
- Mise d'une plaque métallique au-dessus du téflon ;
- Fermeture de la presse, avec une pression normale pour 6 min, puis augmentation de la pression jusqu'à 100 bars pour 1 min ;
- Ouverture de la presse ;

- Enlèvement et refroidissement de la plaque en plastique par l'application d'un chiffon mouillé sur le téflon supérieur et inférieur ;
- Enlèvement des téflons, puis découpe de la plaque ainsi obtenue par un couteur. Enfin, on obtient une plaque prête à être reformulé selon le besoin.



Figure II.6. Etapes de production d'une plaque plastique.

II.3.2 Elaboration des plaques composites

II.3.2.1 Composite renforcé par des fibres de verre

La fabrication du composite constitué par une matrice thermoplastique renforcée par des fibres de verre est effectuée selon les étapes suivantes (Figure II.7) :

- Dépôt du papier téflon sur la plaque chauffante inférieure pour éviter l'adhésion du plastique sur la plaque ;
- Dépôt du moule (un cadre métallique) sur le téflon ;
- Une plaque en plastique déjà élaborée (selon le protocole de la figure II.6), ensuite le dépôt d'un tissu de fibre de verre sur la plaque. Cette opération est répétée deux fois, on termine par le dépôt d'une plaque plastique.
- Dépôt d'un papier téflon, sur lequel est déposée une plaque métallique ;
- Fermeture de la presse ayant déjà les plaques préchauffées à 200 °C, avec une application d'une faible pression pendant 6 min suivie par une augmentation de la pression à 100 bars pendant 1 min. Le but est de fusionner la plaque en plastique dans l'empreinte du moule afin d'avoir le collage des fibres de verre.
- Ouverture de la presse, le moule est retiré à l'aide des gants contre la haute température, ensuite la plaque est refroidie avec un tissu mouillé pour solidifier et faciliter l'enlèvement du téflon et enfin, avec un cutter la plaque est séparée du moule.

Cette technique nous permet de réaliser des plaques renforcées par des fibres de verre (Figure II.7).

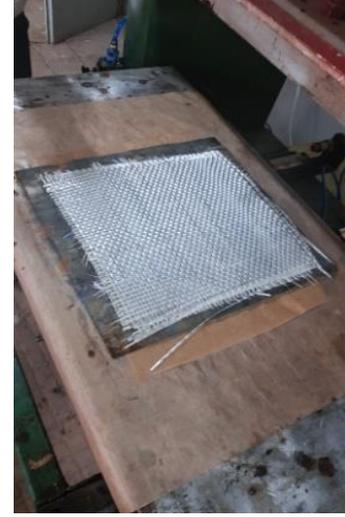




Figure II.7. Préparation des plaques composites renforcées par fibre de verre.

II.3.2.2 Composite renforcé par des fibres de palmier dattier

La fabrication de plaque en composite à matrice thermoplastique renforcée par des fibres de palmier dattier s'effectue de la même manière que celui des fibres de verre (Figure II.7). En d'autres termes, c'est le même principe comme celui du précédent renforcement par fibre de verre, mais cette fois-ci on utilise les fibres naturelles comme renfort (Figure II.8).



Figure II.8. Préparation des plaques composites renforcées par des fibres de palmier dattier.

II.4 Découpe des plaques en éprouvettes

Les plaques en plastique et en composite élaborés en été découpées, à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamant, en éprouvettes selon les normes en fonction du type de test : traction et impact par Charpy.

II.4.1 Découpe des plaques en éprouvettes de traction

Découpe des plaques en éprouvettes (Figure II.9), pour essai traction ayant pour dimensions 25 x 250 (mm²), par l'utilisation d'une tronçonneuse à disque diamant (Tile cutter marque Vigex).

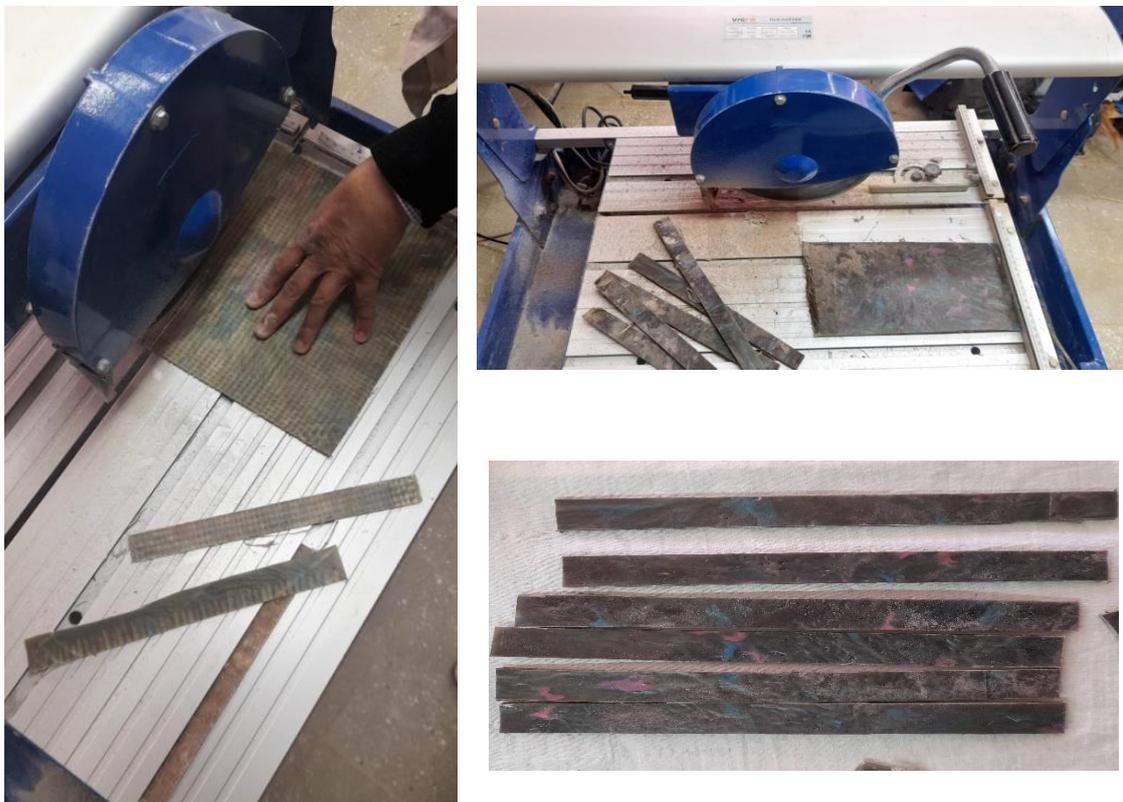


Figure II.9. Découpe des plaques plastique et composite en éprouvettes de traction.

II.4.2 Découpe des plaques en éprouvettes pour l'essai Charpy

La découpe des plaques plastique et composite en éprouvettes pour les essais de Charpy (Figure II.10) ont été réalisés par la même tronçonneuse à disque diamant (Tile cutter marque Vigex) ayant pour dimensions de 15 x 150 (mm²).



Figure II.10. Eprouvette pour essai de Charpy.



Figure II.11. Différentes éprouvettes obtenues pour les essais de traction et Charpy.

Où :

(1) et (5) sont respectivement les éprouvettes en composite renforcé par des fibres de verre de de palmier dattier pour les essais de traction.

(2), (3) et (4) sont respectivement les éprouvettes en plastique, composite renforcé par des fibres de verre et palmier dattier pour des essais Charpy.

II.5 Caractérisation mécanique

II.5.1 Essai de traction

Les essais mécaniques de traction ont été réalisés sur des éprouvettes rectangulaires (Figure II.11). Les éprouvettes testées sont conformément aux spécifications des normes d'essais normalisés et sont soumises à une déformation, à des vitesses constantes de 5, 10 et 50 mm/min jusqu'à leurs ruptures. L'éprouvette soumise sous traction est représentée sur la figure 9.

Le comportement mécanique des différents mélanges mis en œuvre, a été mesuré à partir d'essais de traction uni axiale sur une machine de type Multipurpose Servo-hydraulic (Universal testing system-Séries UTM 100 kN), à une température ambiante (~23°C).

Elle permet, la mesure et l'enregistrement de la force nécessaire à un allongement donné à vitesse constante.

Ainsi, à partir du tracé de la courbe contrainte en fonction de la déformation obtenue, on détermine les valeurs du module, des contraintes et des déformations correspondantes.

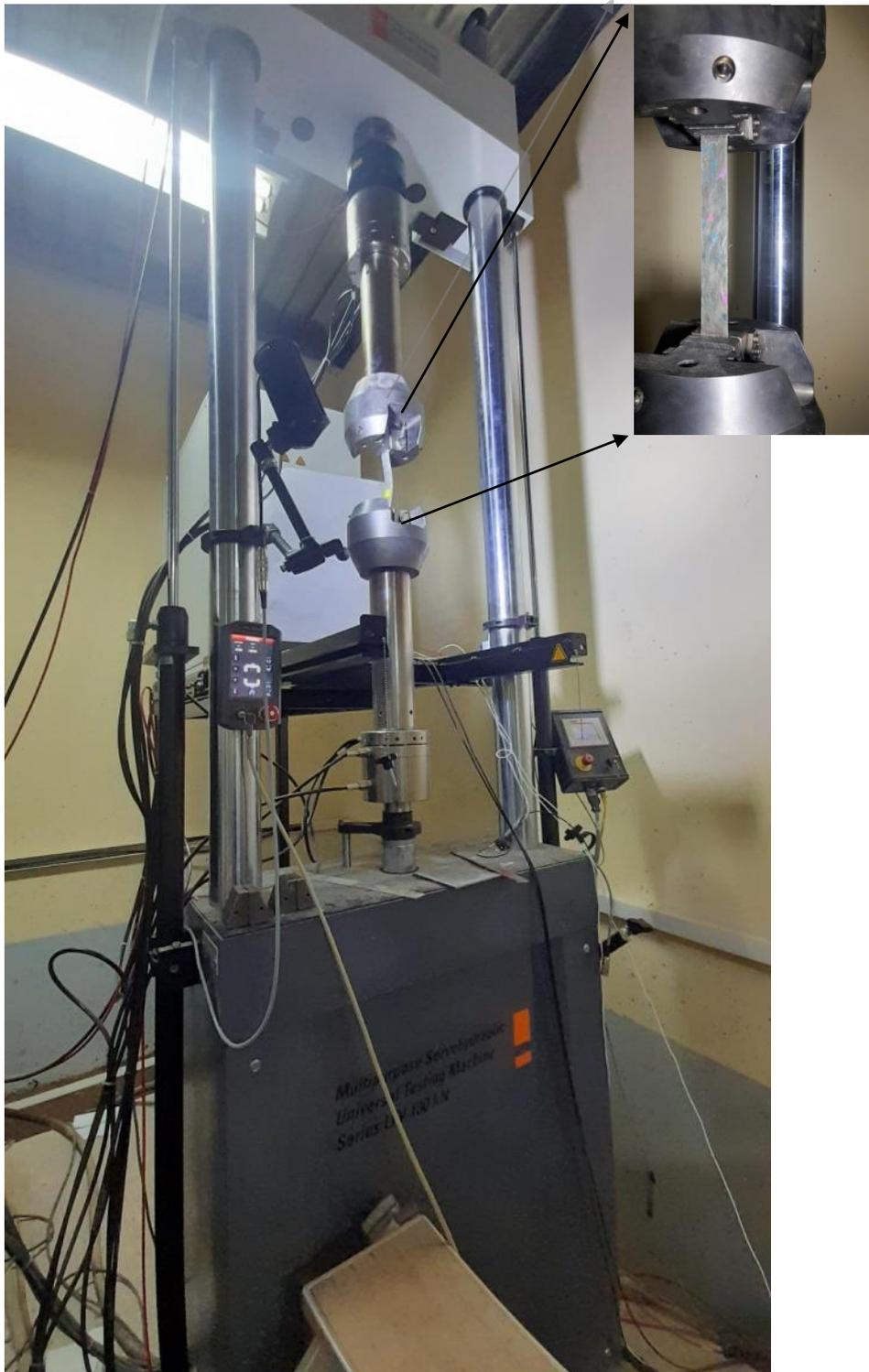


Figure II.12. Machine de Traction « éprouvette soumise à la traction ».

II.5.2 Essai de Charpy

L'essai Charpy a pour but de déterminer la résistance aux chocs des matériaux, permettant aussi de caractériser le comportement à la rupture d'une éprouvette contenant ou non un défaut initial.

Elle est réalisée à l'aide d'un appareil de marque (PHYWE), par l'application d'une sollicitation mécanique à grande vitesse de percussion avec une énergie élevée, engendrant la rupture d'une éprouvette en une fraction de seconde. Cet essai permet de déduire dans des conditions expérimentales données, la fragilité ou la ductilité du matériau.

Pour un souci de reproductibilité des résultats, six essais sont réalisés dont trois horizontaux et trois verticaux, et la valeur moyenne est retenue.

La caractéristique mesurée est la résistance au choc (résilience symbole K).



Figure II.13. Equipement pour essai Charpy avec une éprouvette mise en essai.

II.6 Conclusion

Le présent chapitre résume les différentes étapes, suivi afin de montrer les effets de traitement et la teneur des fibres des palmiers sur les propriétés mécaniques des matériaux plastique et composites.

Tout d'abord, dans une première étape les préparations des différentes plaques en plastique recyclée et en composite en fibre de verre et en fibre de palmier dattier ont été décrit.

On constate que la bonne dispersion des fibres et l'homogénéisation du mélange dépend du taux des fibres et des conditions de mise en œuvre faite par

thermocompression.

Dans une seconde étape, la mise en forme des éprouvettes normalisées de chaque essai (traction et Charpy) se fait par découpe à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté.

Les machines utilisées pour les caractérisations mécaniques par traction et Charpy ont été aussi présentés.

CHAPITRE III:

RESULTAT ET DISSCUSSION

III.1 INTRODUCTION

Ce travail est une étude expérimentale comparative entre une résine thermoplastique recyclé non renforcé et celle renforcée par des fibres de palmier et de verre. Nous avons étudié l'élaboration et l'évaluation des propriétés mécaniques en traction et par choc (Charpy) afin d'identifier l'effet et le rôle du renforcement par des fibres (végétale et synthétique) dans les composite à matrice thermoplastique.

III.2 Résultats et discussions

III.2.1 Essai de traction

Un essai de traction consiste à soumettre une éprouvette normalisée à un effort de traction, généralement jusqu'à sa rupture. Cette essai permet principalement de déterminer les propriétés mécaniques d'un matériau, en se référant à la section initiale de l'éprouvette, à savoir la force ou la contrainte ultime, déplacement ou déformation, module de Young et coefficient de Poisson. Ces grandeurs caractéristiques sont en principe utilisées à des fins de comparaisons.

Tableau III.1 : Dimensions des éprouvettes utilisées dans l'essai de traction.

Matériau	Vitesse (mm/min)	Désignation	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
Plastique	5	P_Ep ₁	25,19	4,36
	10	P_Ep ₂	26,38	4
	50	P_Ep ₃	25,73	4
Composite fibre de verre	5	CV_Ep ₁	25,00	3,68
		CV_Ep ₂	26,00	3,71
	10	CV_Ep ₁	24,30	4,25
		CV_Ep ₂	24,40	3,90
	50	CV_Ep ₁	24,28	3,99
		CV_Ep ₂	24,68	3,99
Composite fibre de palmier	5	CP_Ep ₁	25,35	4,60
		CP_Ep ₂	25,64	4,31
	10	CP_Ep ₁	26,00	4,50
		CP_Ep ₂	25,35	4,35
	50	CP_Ep ₁	25,90	4,90
		CP_Ep ₂	25,90	4,90

III.2.1.1 Essai de traction pour éprouvette en plastique

La figure III.1 représente la courbe de réponse force/déplacement ou contrainte déplacement d'une éprouvette en plastique sollicitée en traction monotone avec une vitesse à 5 mm/min. Le comportement présenté en figure 1 s'effectue en quatre phases : l'augmentation linéaire de la force en fonction de déplacement jusqu'à 0,65 kN dans la première phase, puis la courbe s'infléchit d'une manière non linéaire (2^{ème} phase) jusqu'à une force de 0,72 kN, suivie par un quasi plateau (ou la force est comprise entre 0,72 et 0,87 kN) représentant la déformation plastique jusqu'à la limite maximale de l'éprouvette (3^{ème} phase). La rupture obtenue dans la 4^{ème} phase et ne s'effectue qu'après la formation d'une striction (diminution de la section de l'éprouvette).

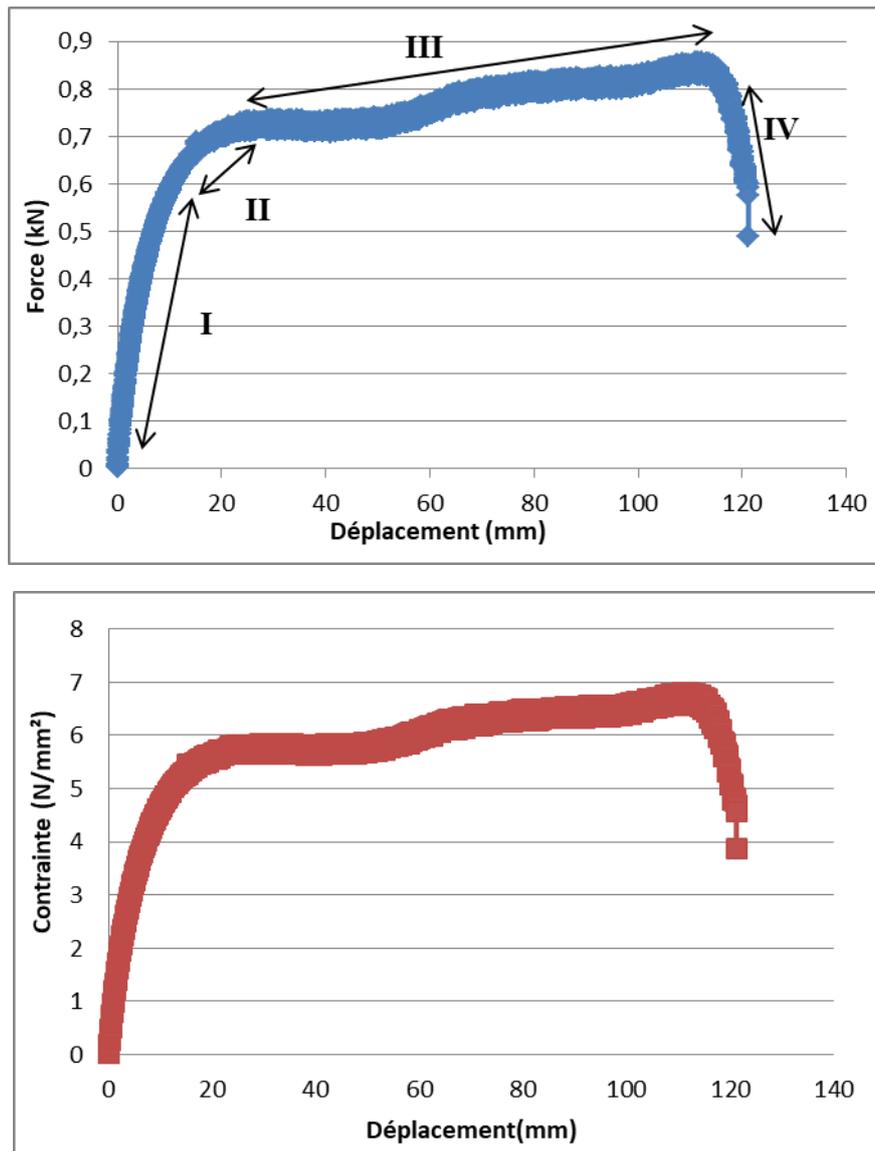


Figure III.1. Courbe de force-déplacement et contrainte-déplacement d'une éprouvette en plastique testé en traction avec une vitesse de 5 mm/min.

Les mécanismes d'endommagement de l'éprouvette en plastique testé en traction avec une vitesse de 5 mm/min sont présentés dans la figure III.2. L'augmentation de la force, provoque l'apparition d'une striction dans l'éprouvette, suivie par l'apparition d'une fissure qui se développe jusqu'à la rupture totale de l'échantillon.

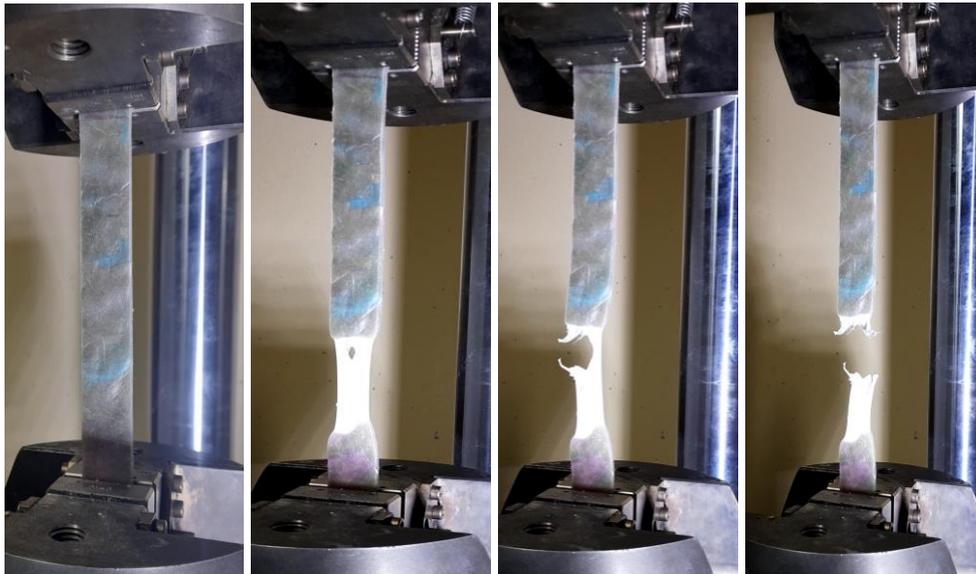


Figure III.2. Evolution des faciès de rupture lors d'un essai de traction sur une éprouvette de plastique recyclée testé avec $V = 5$ mm/min.

L'augmentation de la vitesse de chargement à 10 mm/min (Figure III.3) provoque principalement une augmentation de l'allongement de l'éprouvettes et aussi le comportement après l'atteinte de la charge ultime change sensiblement et la rupture devient plutôt ductile que fragile.

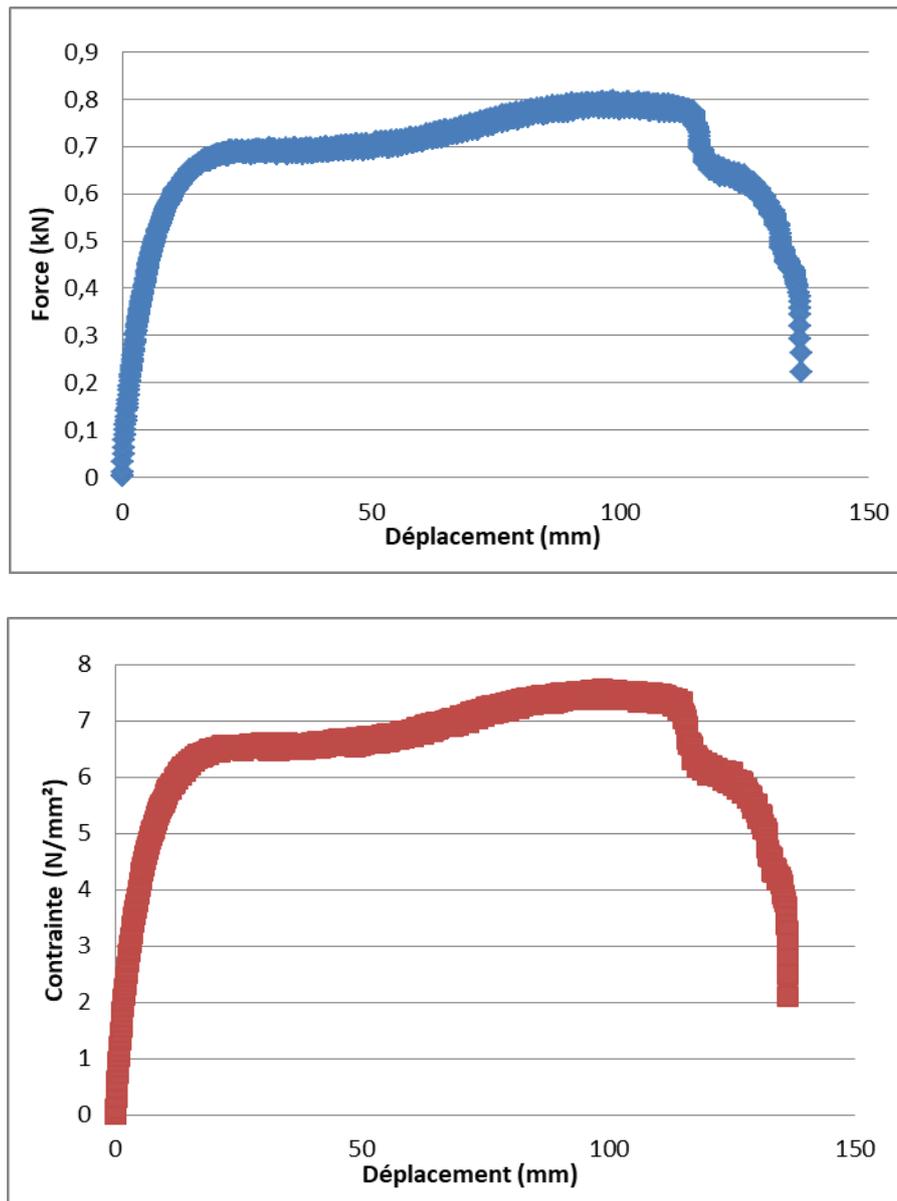


Figure III. 3. Courbes force-déplacement et contrainte-déplacement d'une éprouvette en plastique testé en traction avec une vitesse de 10 mm/min.

La figure III.4 montre l'effet de l'augmentation de la vitesse de 10 fois (c'est-à-dire de 5 à 50 mm/min) provoquant ainsi un allongement plus important de l'éprouvette, de l'ordre de 225 mm, enregistrant ainsi une augmentation de l'ordre de 95 % et qui forme un plateau plus stable du point de vue de la fluctuation de la force (ou de la contrainte). De plus, un changement aussi du comportement après l'atteinte à la force ultime jusqu'à la rupture brutale qui a été aussi noté.

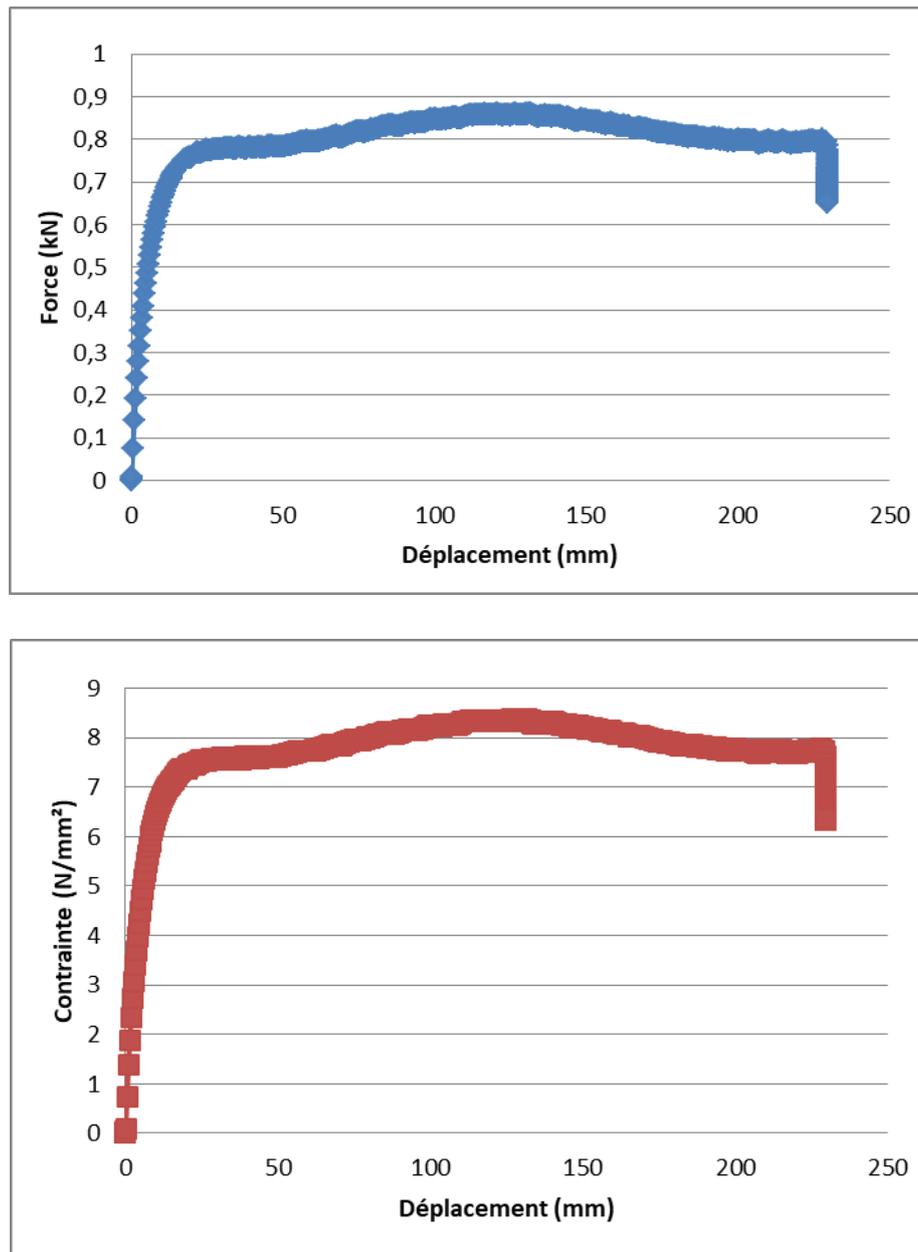


Figure III.4. Courbes force-déplacement et contrainte-déplacement d'une éprouvette en plastique testé en traction avec une vitesse de 50 mm/min.

III.2.1.2 Essai de traction pour éprouvette en fibre de verre

La figure III.5 représente les courbes de réponses force-déplacement et contrainte-déplacement de deux éprouvettes en plastique renforcé par des fibres de verre ou le comportement est complètement différent de celui du plastique recyclé (Figure III.4). Ce comportement s'effectue seulement en trois phases : une première quasi-linéaire jusqu'à

l'attente de la charge ou de la contrainte maximale (ultime) avec une formation d'une striction dans la section de l'éprouvette (Figure III.6), ce qui provoque une chute brutale de la force ou de la contrainte et enfin la formation d'un plateau avant la rupture totale des éprouvettes.

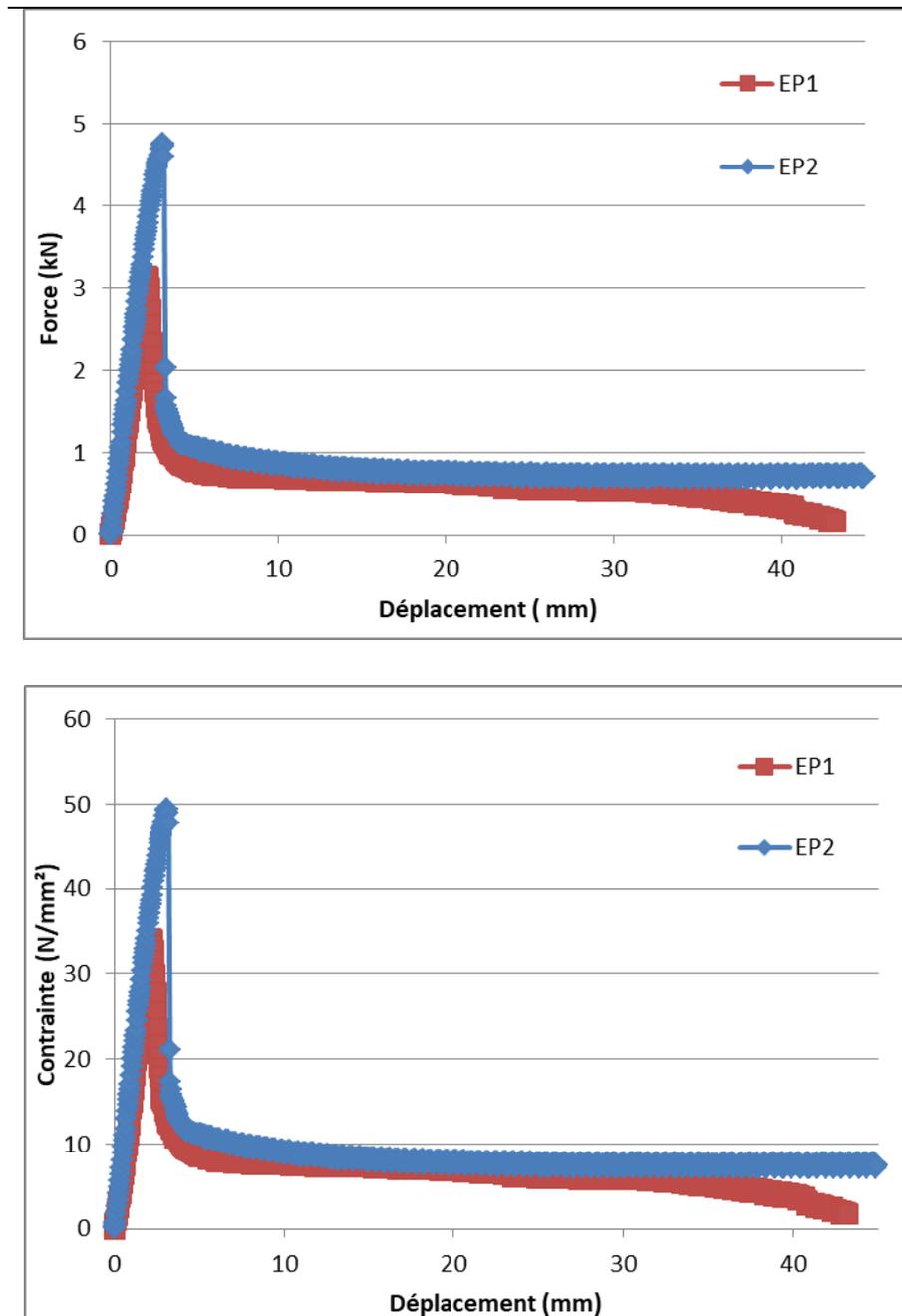


Figure III.5. Courbe Force –déplacement et Contrainte-déplacement d'une éprouvette en composite renforcé par des fibres de verre testé en traction avec une vitesse de 5 mm/min.

Les éprouvettes renforcées possèdent une charge ultime d'au moins 400 % plus élevée avec un déplacement de l'ordre de 300% plus faible comparativement à ceux en plastique non renforcé.

Il est à noter aussi que les résultats se caractérisent par une dispersion, plus ou moins importante, de la charge ou de la contrainte ultime.

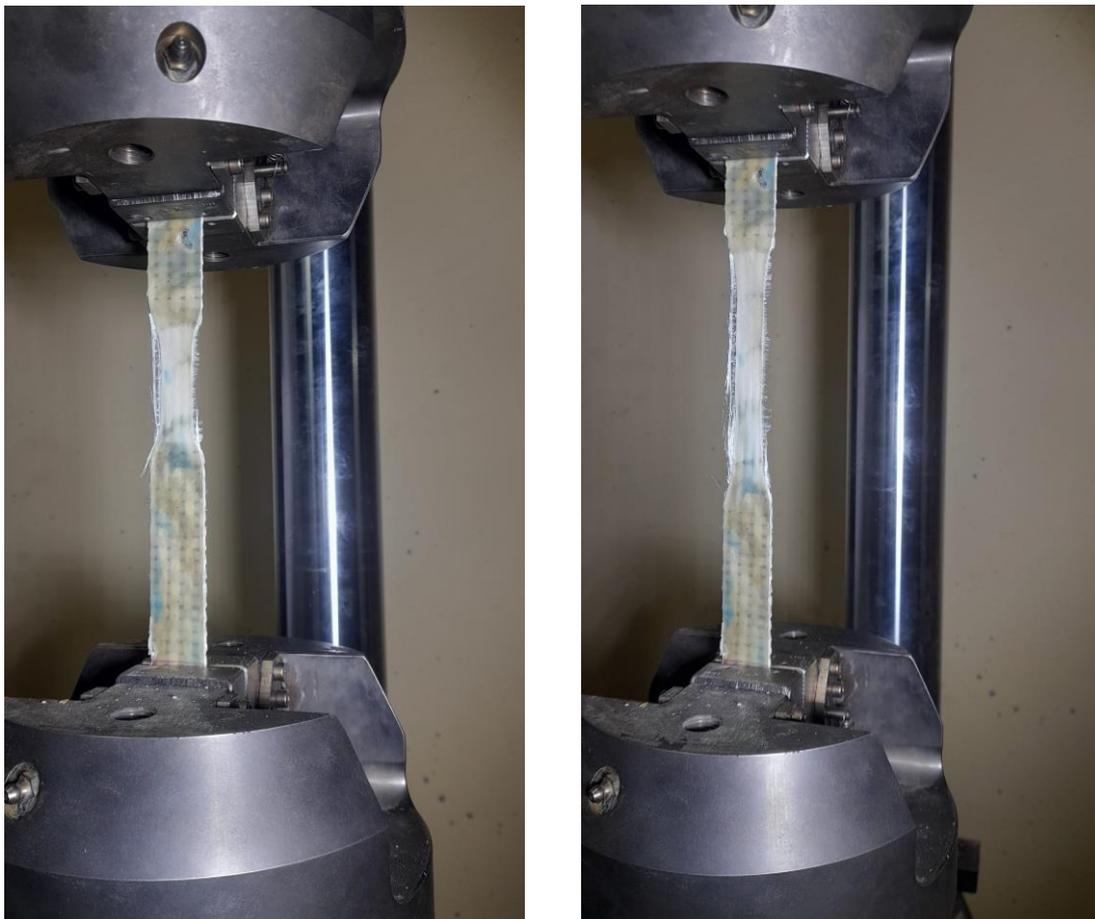


Figure III.6. Faciès de rupture d'une éprouvette en composite renforcé par des fibres de verre testée en traction avec une vitesse de 5 mm/min.

L'augmentation de la vitesse de chargement à 10 mm/min (Figure III.7) provoque principalement une augmentation de l'allongement ainsi que la charge ultime des éprouvettes de l'ordre de 15 à 20 % comparativement à un chargement de 5 mm/min. La charge ultime moyenne est de l'ordre de 4,4 kN et le déplacement à la rupture moyen enregistré est de

l'ordre de 56 mm. Il est à noter que la charge ultime se caractérise par une dispersion importante car la charge entre l'éprouvette 1 et 2 et que la rupture devient plus ductile.

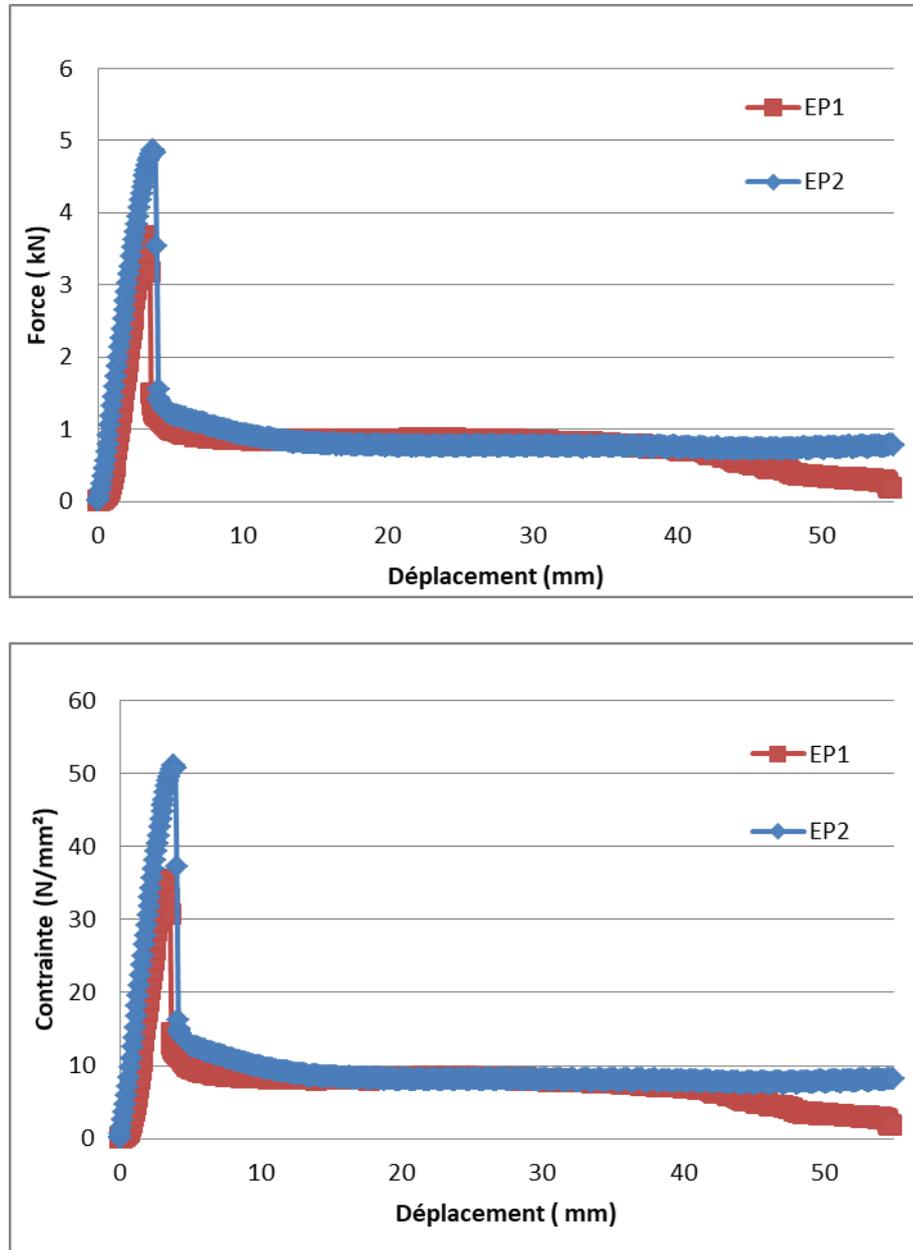


Figure III.7. Courbe force-déplacement et contrainte-déplacement des composites renforcées par des fibres de verre testés en traction avec une vitesse de 10 mm/min.

Les courbes force-déplacement des deux éprouvettes composites testées en traction avec une vitesse de 50 mm/min sont présentées dans la Figure III.8. La variation de la force

en fonction du déplacement s'effectue en trois phases distinctes, commençant par une augmentation croissante linéaire jusqu'à l'atteinte de la force maximale de 4,37 kN et 5,49 kN enregistré respectivement pour les éprouvettes Ep_1 et Ep_2 , suivie par une chute brutale de la force et l'allongement de l'éprouvette ce qui nous permet de déterminer la limite d'élasticité jusqu'à la rupture totale. Il est important de noter que l'augmentation de la vitesse de chargement de 5 mm/min à 50 mm/min conduit à une augmentation de la force ou contrainte ultime moyenne de l'ordre de 25 % mais une réduction dans le déplacement moyen de l'ordre de 29 %.

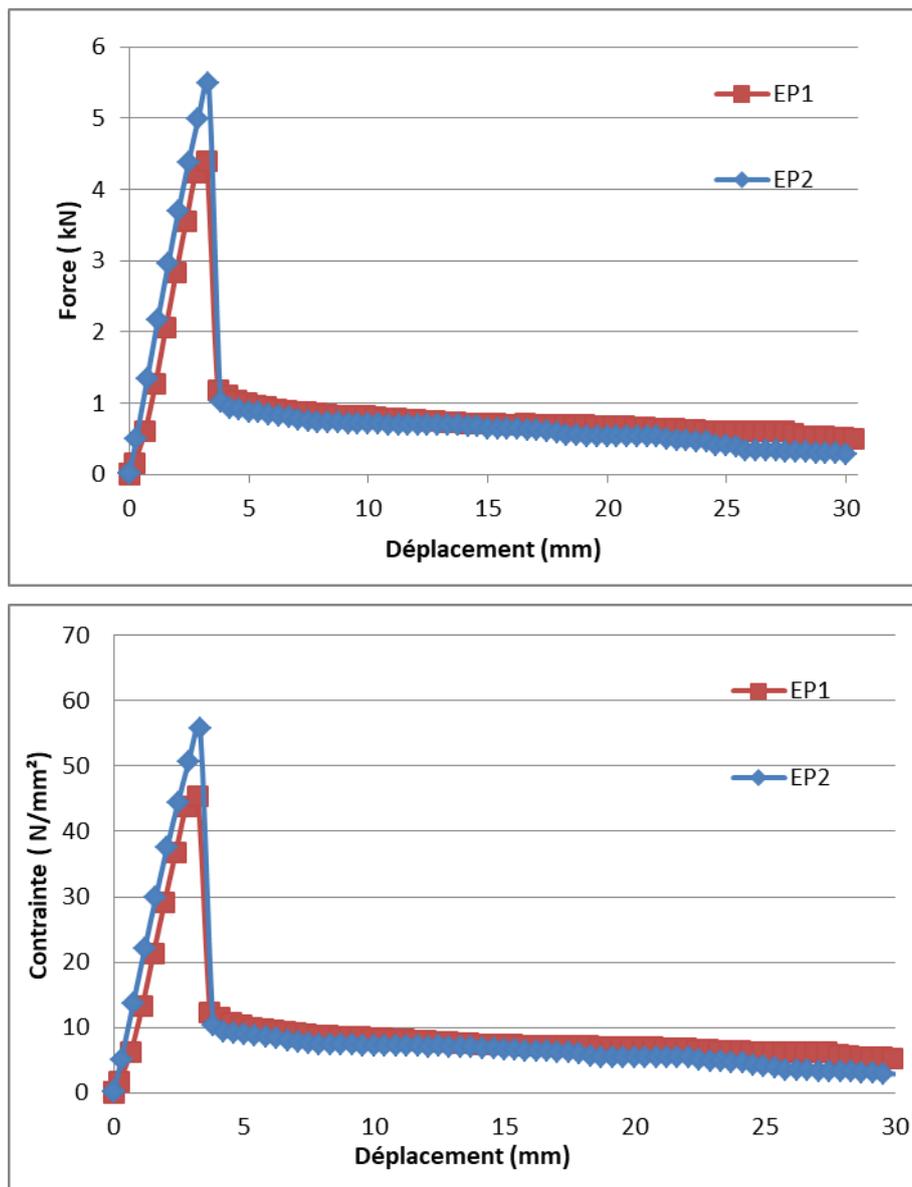
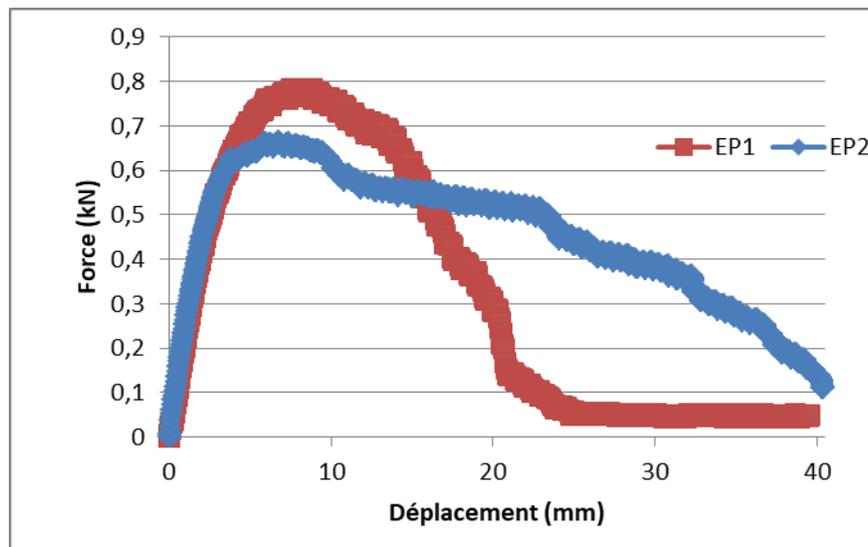


Figure III.8. Courbe force-déplacement et contrainte-déplacement des composites renforcés par des de fibres de verre testés en traction avec vitesse 50 mm/min.

III.2.1.3 Essai de traction pour éprouvette en fibre de palmier

La figure III.9 représente la courbe de réponse force/déplacement ou contrainte déplacement d'une éprouvette en composite renforcé par des fibres de palmier sollicité en traction avec une vitesse à 5 mm/min. On remarque le comportement de ces deux éprouvettes Ep₁ et Ep₂ s'effectue en trois phases : l'augmentation de la force d'une manière linéaire puis non linéaire jusqu'à l'atteinte de son maximum à 0,80 kN et 0,65 kN respectivement pour les éprouvettes Ep₁ et Ep₂ en fonction de déplacement respectivement dans la première et la deuxième phase, suivi par une striction de l'éprouvette dont son développement conduit à une chute de la force ou de la contrainte d'une manière non linéaire avec l'augmentation du déplacement, en raison de la dilation des éprouvettes, jusqu'à la rupture.



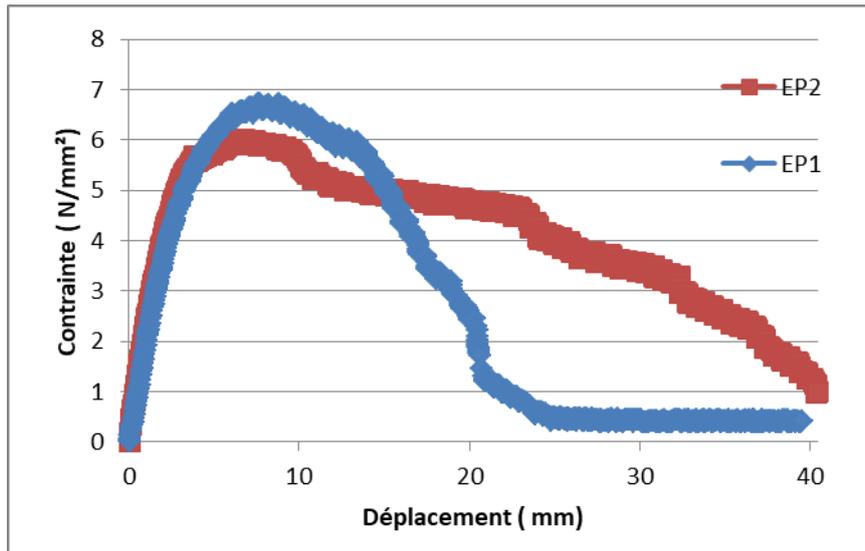


Figure III.9. Courbe force–déplacement et contrainte–déplacement des échantillons des composites renforcé par des fibres de palmier testés en traction avec une vitesse 5 mm/min.

La figure III.10 représente les faciès de rupture lors de l'évolution du chargement en traction des composites renforcé par des fibres de palmier dattier testés en traction avec une vitesse de 5 mm/min. La formation de la striction apparaît lors de l'atteinte de la charge ou contrainte ultime et son développement est freiné par les fibres jusqu'à la ruine finale de l'éprouvette.

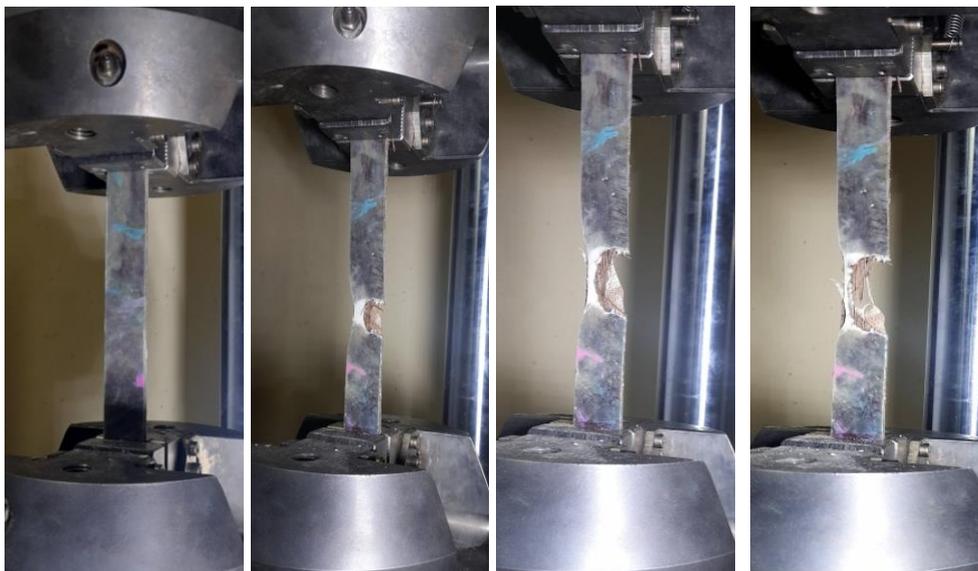


Figure III.10. Faciès de rupture d'un composite renforcé par des fibres de palmier dattier sollicité en traction avec une vitesse de 5 mm/min.

L'augmentation de la vitesse de chargement de 5 mm/min (figure III. 9) à 10 mm/min (Figure III.11) d'un composite renforcé par des fibres de palmiers dattier sollicité en traction provoque un changement radical dans la courbe de réponse force-déplacement ou contrainte-déplacement.

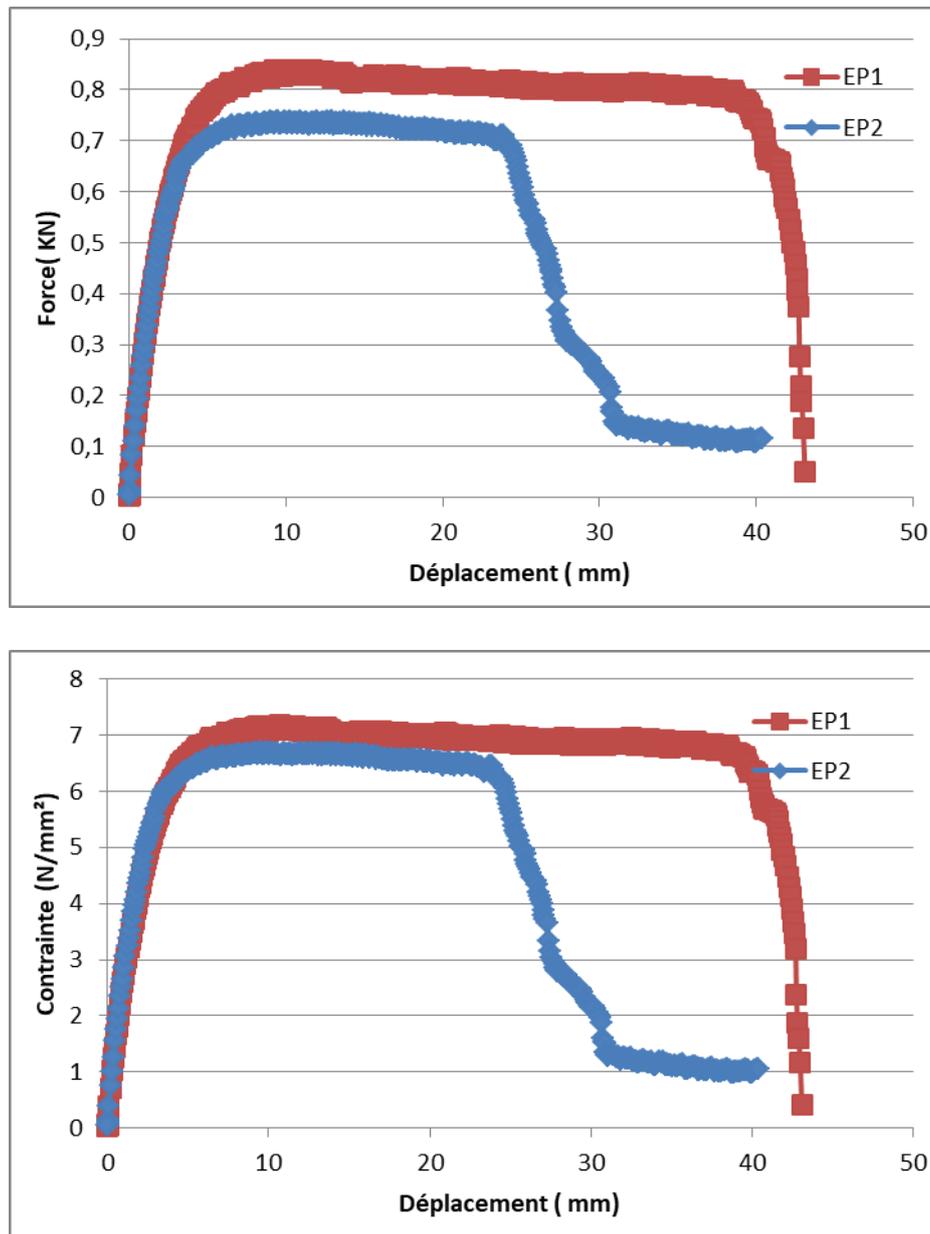


Figure III.11. Courbes de réponse force-déplacement et contrainte-déplacement d'un composite renforcé par des fibres de palmier testé en traction avec une vitesse de 10 mm/min.

En effet, l'augmentation de la force (ou de la contrainte) est linéaire, suivie par une zone de transition non linéaire jusqu'à l'atteinte d'une force (ou contrainte) maximale ou un plateau se forme jusqu'à l'apparition d'une striction dont son allongement provoque la rupture de l'éprouvette qui se caractérise par une chute brutale de la force (ou de la contrainte).

Il est important de noter aussi que l'augmentation de la vitesse de 5 mm/min à 10 mm/min a conduit à une augmentation très importante du déplacement à la rupture suite à la formation du plateau. De plus, la charge maximale (ou ultime) a légèrement augmenté aussi.

L'augmentation de la vitesse de 10 fois (de 5 à 50 mm/min) conduit à des courbes de réponses similaires du point de vue comportement force-déplacement ou contrainte déplacement (Figure III.12). Par contre, il conduit à une réduction de l'ordre de 50% de l'allongement moyen de l'éprouvette et une augmentation de la charge ou de la contrainte ultime moyenne augmentent d'environ 20% et la rupture est plutôt ductile.

Le comportement à une vitesse de chargement de 50 mm/min (Figure III.12) est très différent de celui de 10 mm/min (Figure III.11).

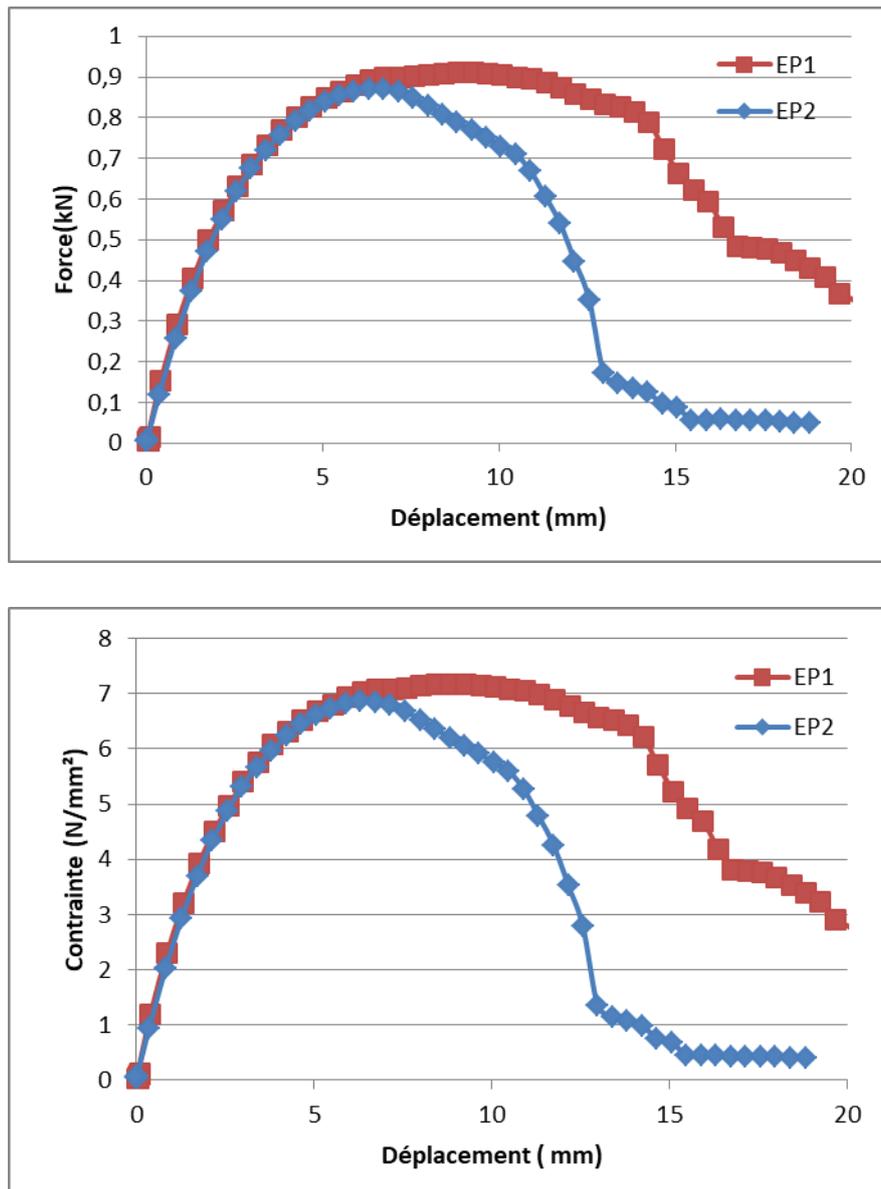


Figure III.12. Courbe force-déplacement et contrainte-déplacement des composites renforcés par des fibres de palmier testés en traction avec une vitesse 50 mm/min.

III.2.2 Influence du matériau composite sur éprouvette

Figure III.13. représente une augmentation linéaire de la force en fonction de déplacement pour l'éprouvettes plastique/fibre de palmier, puis la courbe s'infléchit, suivie par un quasi plateau représentant la déformation plastique jusqu'à la limite maximale de l'éprouvette, et par rapport au fibre de verre représente une grande dispersion, ou on peut remarquer que l'utilisation de la charge appliquée cause l'augmentation de la force critique et

diminution de déplacement critique effondré par une chute brutale de la force exercée jusqu'à la rupture total.

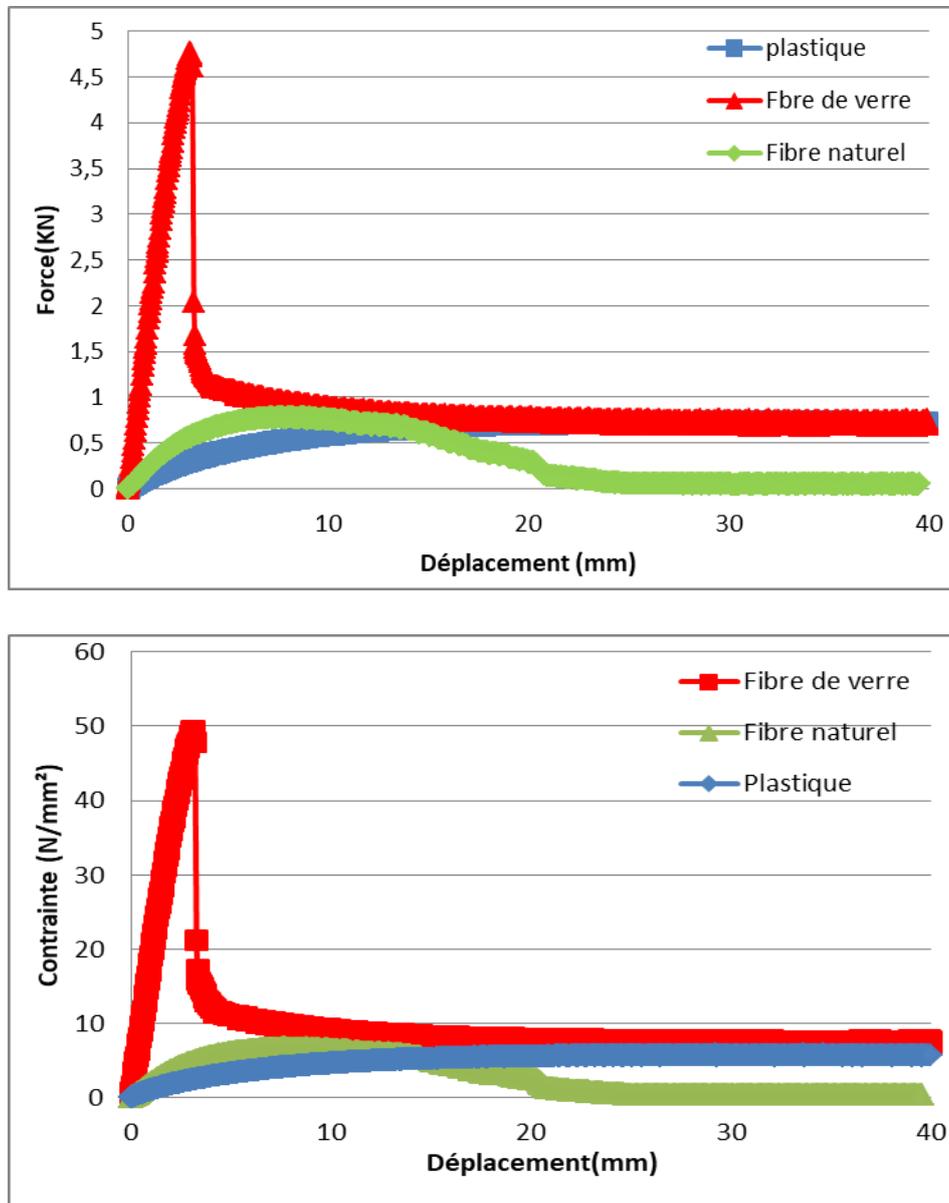


Figure III.13. Courbe de comparaison de force-déplacement et contrainte-déplacement des éprouvettes en plastique et composite renforcé par des fibres de verre et de palmier testé en traction avec une vitesse de 5 mm/min.

L'augmentation de la vitesse à 10 mm/min montre que le comportement du plastique/fibre de palmier (figure III.14), passe une phase linéaire suivi par un allongement sous forme d'un plateau plastique jusqu'à l'atteinte de la rupture, par contre en fibre de verre on remarque l'augmentation de la force en fonction de déplacement au maximum jusqu'à la

striction (5 fois la résistance que plastique/fibre de palmier), suivi par une rechute de la force avec un allongement jusqu'à la rupture.

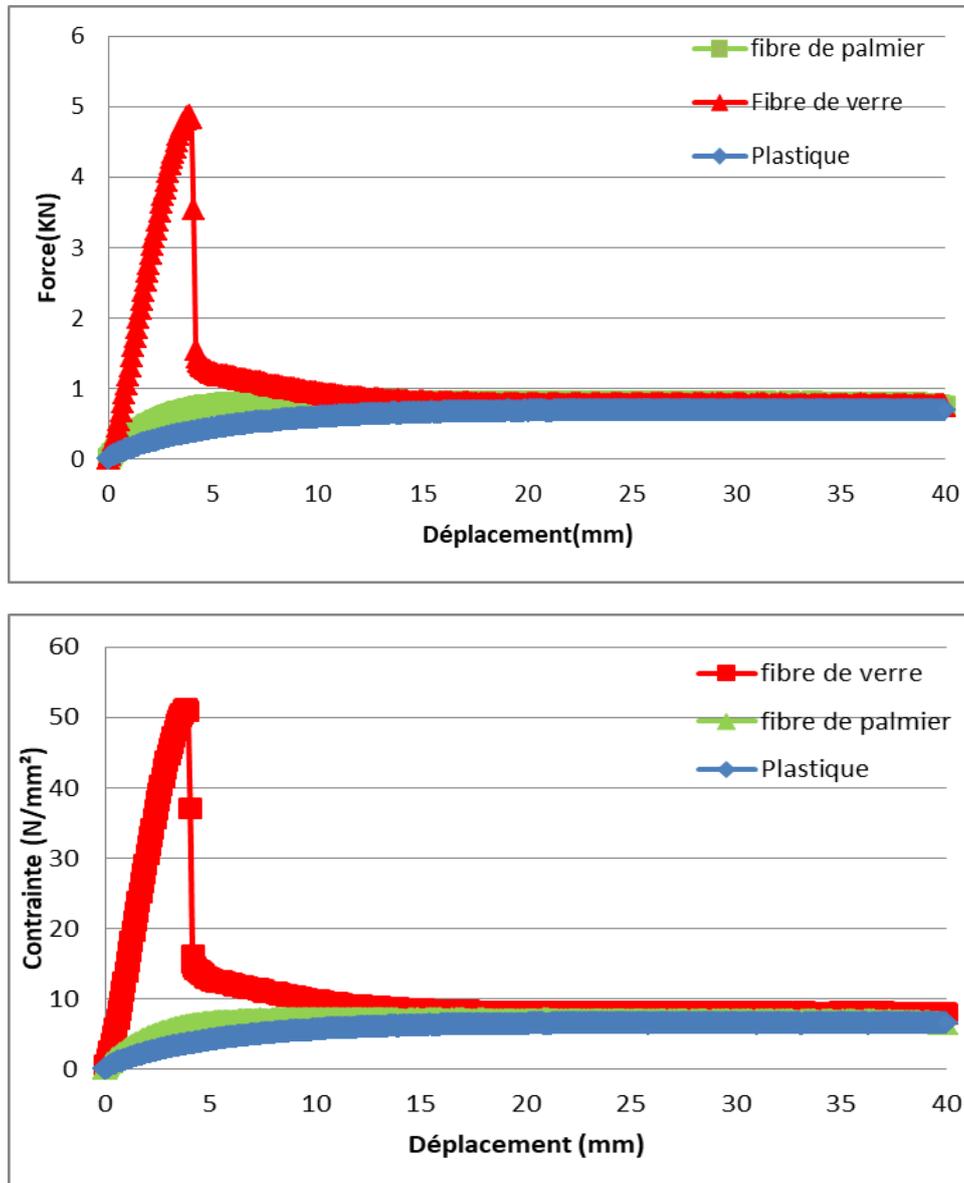


Figure III.14. Courbe de comparaison de force-déplacement et contrainte-déplacement des éprouvettes en plastique et composite renforcé par des fibres de verre et de palmier testé en traction avec une vitesse de 10 mm/min.

La figure III.15 montre l'effet de l'augmentation de la vitesse de 10 fois (de 5 à 50 mm/min) provoque un allongement dans l'éprouvette plastique/fibre de palmier qui forme un plateau avec un comportement fragile, contrairement au fibre de verre nous montre une

contrainte maximale presque cinq fois que les autres éprouvettes, une résistance immense et très importante, puis une chute brutale avec l'allongement des éprouvettes jusqu'à la rupture.

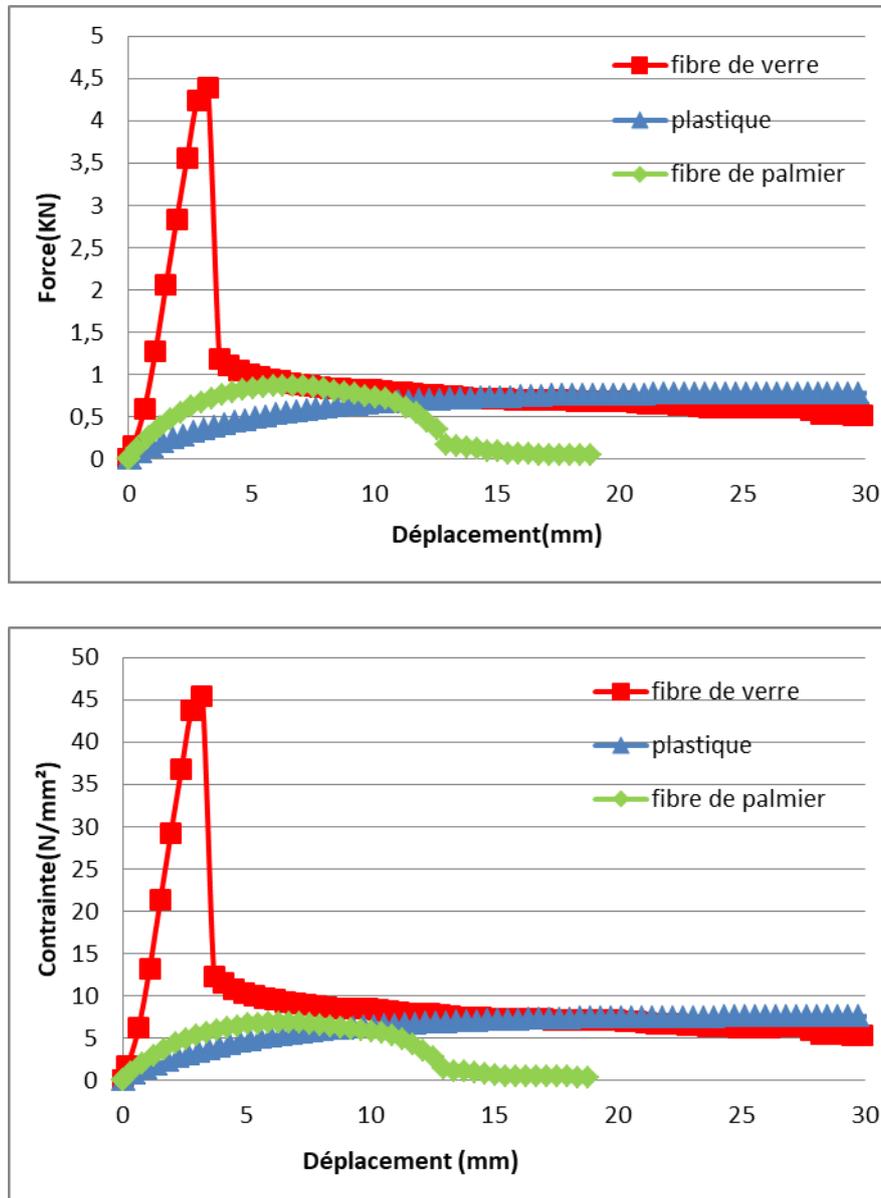


Figure III.15. Courbe de comparaison de force-déplacement et contrainte-déplacement des éprouvettes en plastique et composite renforcé par des fibres de verre et de palmier testé en traction avec une vitesse de 50 mm/min.

III.3 Essai de Charpy

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique. Un des moyens pour caractériser la fragilisation d'un métal sous l'action d'un choc est l'essai de résilience.

Les paramètres de ténacité : si l'énergie à fournir pour produire une fracture dans une éprouvette est importante, on dira que le matériau est « tenace ».

La résistance au choc ou résilience est caractérisée par le rapport de l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette en un seul coup sur l'aire de la section rompue ; c'est l'aptitude que possède un matériau à résister aux chocs.

Lors de l'essai, une force de poids va tomber d'une certaine hauteur, à ce moment on va enregistrer au niveau de l'éprouvette un certain travail que l'on va noter.

Lorsque l'éprouvette sera cassée, on aura enregistré un travail résiduel, ce qui va nous permettre de déterminer le travail nécessaire pour rompre l'éprouvette.

Trois différents types d'éprouvettes ont été utilisés : plastique, plastique renforcée par des fibres de verre et par des fibres naturelles (fibre de palmier).

Caractéristiques des éprouvettes :

- Longueur de l'éprouvette : 15 mm
- Largeur de l'éprouvette : 150 mm
- Hauteur de l'éprouvette : 5 mm

Les résistances au choc de la matrice polymère et celles des composites sont présentées dans le tableau III.2.

Plus les matériaux sont fragiles, moins ils seront résilients, malgré que l'essai de résilience est destructif, c'est-à-dire que les éprouvettes sont détruites, il est d'une grande importance, car il est impératif de tenir compte de la résistance aux chocs d'un matériau avant de l'utiliser en construction mécanique par exemple.

D'après les résultats du choc Charpy sur des éprouvettes horizontale et verticales pour la résine thermoplastique recyclé et le composite de fibre de verre et fibre de palmier, nous remarquons que la résistance au choc est plus élevée pour les éprouvettes horizontales de résine recyclée que pour les éprouvettes horizontales du composite.

On observe une diminution de la résistance au choc pour les matériaux élaborés par rapport à celle du plastique pour les éprouvettes verticales, on remarque une diminution est due au manque d'interaction des fibres ajoutée, dans ce cas une force externe plus faible peut causer le décollement matériaux a renfort (fibre de verre et de palmier) conduisant à la fragilisation du matériau, en effet, la diffusion de l'onde de choc est limitée à cause de la taille réduite de la section des éprouvettes ainsi que la possibilité de présence d'impuretés dans le plastique recyclée.

Tableau III. 2. Valeur de résistance au choc pour les éprouvettes en plastique, composites plastique renforcé par des fibres de verre ou de palmier.

Eprouvette (joule)	Démentions		Energie Plastique	Démentions		Energie Composite FV	Démentions		Energie Composite FP
	B (mm)	H (mm)		B (mm)	H (mm)		B (mm)	H (mm)	
EP ₁ (Horizontale)	4,68	18	8	3	18	4,5	4	15,69	0,5
EP ₂ (Horizontale)	5	18,62	6,5	3,52	16,4	4,5	4	15,74	1,25
EP ₃ (Horizontale)	4,72	16.56	5,5	3,35	17	4,5	4,34	15	2
EPm (H)			6,67			4,5			1,25
EP ₁ (Vertical)	5,69	16	2,5	3,35	17	1	4,22	15	0,5
EP ₂ (Vertical)	5,42	17	2,5	3,55	17,64	0,5	4,22	15,27	0,5
EP ₃ (Vertical)	5,86	15,55	1,5	3,49	17	0,5	4,40	15,36	1
EPm (V)			2,17			0,66			0,66

Ont conclue dans notre expérience qui représente la variation de la résilience en fonction du des fibres ajoutée (fibre de verre et fibre de palmier). Dans ce cas, l'effet de la plasticité élevée de la résine recyclée est estompé devant l'effet du renfort. La résistance au choc diminue avec l'augmentation du renforcement des fibres et leur surface, d'autre part, une augmentation pour le plastique recyclé seul.

Les faciès de rupture des éprouvettes en plastique recyclé et composite renforcé par des fibres de verre et palmier dattier testés par Charpy dans le sens horizontal et vertical sont présentées respectivement dans les figures III. 16, III.17 et III.18.



Figure III.16. Faciès de rupture des éprouvettes en plastique testé par Charpy.



Figure III.17. Faciès de rupture des éprouvettes en composite renforcé par des fibres de verre testées par Charpy.



Figure III.18. Faciès de rupture des éprouvettes en composite renforcé par des fibres de palmier testées par Charpy.

III.4 Conclusion

A partir de l'analyse des différents résultats obtenus, on peut déduire les conclusions principales suivantes :

- L'élaboration des composites à base de plastique recyclé et renforcé par des fibres est une technique prometteuse permettant de participer à la préservation de l'environnement.
- Les composites renforcés avec des fibres de verre ou de palmier possèdent des charges ou contraintes ultime largement supérieures par rapport au plastique recyclé.
- Les matériaux composites ont une bonne ténacité et une bonne rigidité tout en conservant sa densité et possèdent une plus grande limite d'élasticité que le plastique vierge mais une faible partie de la plasticité qui le rend fragile.

Conclusion générale

Les matériaux composites à matrice thermoplastique renforcée par des fibres naturelles sont de plus en plus utilisés grâce à leurs multiples avantages particulièrement intéressants et ils sont en cours de développements croissant, en raison de l'amélioration de l'ensemble des propriétés du polymère que peut apporter un renfort en fibre végétale.

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique a été menée sur les types et les différents procédés de fabrication et de mise en œuvre des matériaux composites, leurs domaines d'utilisation dans la vie quotidienne et les différents constituons utilisés pour la fabrication des matériaux composites.

Le chapitre deux décrit l'étude expérimental utilisés pour élaborer et caractériser des composites à matrice thermoplastiques recyclés/fibre de verre et fibre de palmier, par l'utilisation de différentes techniques.

Le Chapitre trois consiste une détermination des propriétés mécaniques des composites thermoplastiques/fibres de verre et fibre de palmier conduisent aux conclusions suivantes :

À la traction, nous avons analysé l'effet de la fibre de verre et de palmier sur le comportement des composites par rapport au plastique recyclée seul, ce dernier se comporte de manière fragile sous traction, par contre aux fibres de palmier et de verre on remarque une grande augmentation à la résistance du matériau composite jusqu'à cinq fois que le plastique seul.

A l'impact (essai de Charpy), lorsque les fibres de verre et de palmier sont ajoutées au plastique recyclée sous la forme d'un matériau composite, montre une bonne ténacité et une bonne rigidité tout en conservant sa densité et possède une plus grande limite d'élasticité que le plastique vierge, mais une faible partie de la plasticité qui le rend fragile.

Références

- [1] Vidil L., Etude de matériaux naturels 2D – Potentialités d'utilisation comme renfort de matériaux composites. Thèse pour le doctorat en chimie des matériaux /UNIVERSITE DES ANTILLES Faculté des Sciences Exactes et Naturelles École doctorale pluridisciplinaire 2019.
- [2] Bahlouli N., Comportement mécanique en température du pli élémentaire d'un composite stratifié Carbone / époxy thèse de doctorat université de strass bourg janvier 1994.
- [3] Berlthelot J-M., Mécanique des Matériaux et Structures Composites. ISMANS Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés. Le Mans, France, 2010.
- [4] Sidahmed F. Elaboration et caractérisation des matériaux composites à fibre végétale. Thèse pour le doctorat en Sciences et Génie des Matériaux. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger 2014
- [5] Geier M., Duedal D. Guide pratique des matériaux composites, TEC & DOC (Lavoisier), Paris, 1985, 349P.
- [6] Abdelmouleh M., Boufi S., Belgacem M.N., Dufresne A., 2007. Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading; Composites Science and Technology 67, 1627-1639.
- [7] Arbelaiz, B. Fernandez, J.A. Ramos, I. Mondragon, 2006; Thermal and crystallization studies of short flax fibre reinforced polypropylene matrix composites: Effect of treatments; Thermochimica Acta 440, 111-121.
- [8] Vi Vi Do Thi. Matériaux composites à fibres naturelles / polymère biodégradables ou non. Alimentation et Nutrition. Université de Grenoble ; Université des Sciences Naturelles d'Ho Chi Minh Ville, 2011. Français. ffNNT : 2011GRENA012ff. Fftel-00652477.
- [9] Zoghi, M., (2013), The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering, CRC Press, 692 p.
- [10] Bourban, P.-E., Carlsson, L., Mercier, J.-P. & Manson, J.-A.-E., (2004), Matériaux composites à matrice organique : constituants, procédés, propriétés, PPUR presses polytechniques, 250 p.