

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



**Mémoire De Fin D'étude**

Présenté par : Melazem Mohi Eddine

**Master**

**Option: conception et production industrielle(CPI).**

=====

***Fabrication et caractérisation  
expérimentale des stratifiés de  
bio-composites***

=====

Sous la Direction de :

**Pr. Abderrezak Bazazi**

**Année universitaire 2012/2013**

# Remerciement



*Je remercie chaleureusement*

*Le Pr. Bezazi Abderrezak D'avoir encadré  
ce travail,*

*Pour tous les précieux conseils qu'ils m'ont apportés  
Plus généralement, tout le personnel*

*Les enseignants, du département de Génie Mécanique*

*Merci à mes collègues qui m'ont accompagné dans ce parcours.*

*Je voudrai remercier tout particulièrement mes parents  
ainsi que tous les membres de ma famille  
de leur soutien et Leur encouragement.*

# *Dédicace*

*Je dédiai ce modeste travail:*

*A Mes parent pour leurs tendresses et sacrifices*

*A mes frères et mes sœurs plus mes Très cher amis*

*Classe de CPI*

*,Abdearahman, Elgayde, Et a tous ceux qui m'ont aidé*

*De près et de loin pour la réalisation de ce Travail,*

*Belâadi Ahmed, BOUCHAHDIANE Karima*

*BOUCHELAGHEM Hafida*

*BEGGAT AMARA*

*MELAZEM Mohieddine.*

# Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Introduction générale	

## *Chapitre I : Etude bibliographique*

<b>Introduction</b> .....	09
<b>Article I</b>	
I.1. Résumé.....	10
I.2. Objectif visé par cet article .....	10
I.2.1. Techniques et méthodologie adopté dans cet article.....	11
I.4. Résultat important dans cet article .....	11
I.4.1. Propriétés mécaniques en flexion .....	11
I.5. Conclusion .....	13
<b>Article II</b>	
II.2. Résumé .....	14
II.2. Objectif visé par cet article .....	15
II.3. Résultat important dans cet article .....	15
II.3.1. Propriétés de dureté .....	15
II.4. Conclusions .....	17
<b>Article III</b>	
III.1. Résumé .....	18
III.2. Objectif visé par cet article .....	18
III.3. Techniques et méthodologie adopté dans cet article .....	19
III.3.1. Matériau .....	19
III.3.2. Préparation des échantillons .....	19
III.3.3. Caractérisation .....	19
III.4. Résultat important dans cet article .....	20
III.4.1. Analyse infrarouge des fibres de Doum .....	20

III.4.2. Stabilité thermique des composites de Doum .....	21
III.4.3. Propriétés thermiques des composites a renfort en fibre de Doum .....	21
III.4.4. Propriétés en traction des composites a renfort en fibre naturelle .....	22
III.4.5. Propriétés de flexion des composites a renfort en fibre naturelle .....	23
III.5. Conclusion .....	24
<b>Article IV</b>	
VI.1. Résumé.....	25
VI.2. Objectif visé par cet article .....	25
VI.3. Techniques et méthodologie adopté dans cet article .....	26
VI.3.1. Caractérisation .....	26
VI.4. Résultats importants dans cet article .....	26
VI.5. Conclusions .....	28
<b>Article IV</b>	
VI.1. Résumé.....	29
IV.2. Objectif visé dans cet article .....	29
IV.3. Techniques et méthodologie adopté par cet article .....	30
IV.3.1. Morphologie de surface .....	31
IV.4. Résultats importants dans cet article .....	31
IV.4.1. Morphologie de la surface .....	31
IV.4.1. Analyse thermique .....	32
IV.4.2. Les transformées de Fourier FTIR .....	33
IV.5. Conclusions .....	34
<b>I. Conclusion</b> .....	35
<b>Chapitre II : Technique expérimentale</b>	
<b>Introduction</b> .....	37
II.1. Plante du jute .....	37
II.1.1. Morphologie de la plante de jute .....	37
II.1.2. Fibre de jute .....	38
II.1.3. Application de la fibre de jute en Textiles.....	39
II.1.4. Technique expérimentale .....	39

II.1.4.1. Caractérisation du renfort .....	39
II.2. Fabrication des plaques Bio-composites Jute/polyester .....	41
II.3. Découpe des échantillons à partir des plaques en bio-composite .....	42
II.1.4. Conditions d'essais .....	43
II.1.4.1. Machine d'essais .....	43
II.1.4.2. Essais statiques .....	44
<b>II.5. Conclusion</b> .....	46

### **Chapitre III Résultats et discussion**

<b>III.1. Introduction</b> .....	48
III.2. Essais de traction .....	48
III.2.1. Caractérisation de Tissu de jute .....	48
III.2.1.1. Les résultats des essais de traction sur le tissu de jute .....	50
III.2.1.1.1. Courbe type des différents tissus .....	54
III.2.1.1.2. Etude statistique de Weibull .....	56
III.2.2. Essai de traction sur les bio-composites stratifiés (tissu de jute/polyester) .....	58
III.2.2.1. Mode d'endommagement des éprouvettes sollicitées en traction monotone .....	59
III.2.2.2. Les résultats des essais de traction sur le Composite stratifié jute/polyester .....	59
III.2.2.2.1. Courbe type des différents bio-composites (tissu de jute/polyester) .....	68
III.3. Essais de flexion dans le sens de la chaîne du composite jute/polyester .....	70
III.3.1. Flexion des Composite stratifié jute/polyester .....	71
III.3.1.1. Courbe type de flexion des différents bio-composites (tissu de jute/polyester) .....	73
III.4. Résine .....	75
III.4.1. Essais de traction et de flexion de la résine polyester .....	75
<b>III.5. Conclusion</b> .....	78

*Conclusion générale*

*Référence bibliographique*

## Résumé

Au cours de ces années, de nombreuses études ont été menées sur les matériaux composites en raison de leurs nombreuses utilisations dans beaucoup de domaines et pour des raisons écologique et économique l'industrie moderne on tendance de développé de nouveaux matériaux composites à renfort en fibres naturelle ayant le caractère biodégradable ou recyclable. Il existe beaucoup de fibres naturelle pouvant être utilisé comme renfort pour les matériaux composites tel que jute, sisal, palmiers, ...etc. Dans cette étude, deux tissus bidirectionnel de jute on été étudiés en traction statique dans le sens de chaine et de la trame dans le but de déterminé leurs propriétés mécaniques (déplacement, déformation, contrainte, module de Yong). Au vue des dispersions importante des résultats, les propriétés mécaniques (contrainte et module de Young) sont évaluées par la méthode statistique de Weibull à deux paramètres. La résine polyester et les bio-composites jute/polyester sont fabriqué sous forme de plaques au laboratoire, puis découpé en échantillon selon les normes, ensuite testés en traction et en flexion dans le sens de la chaine et de la trame.

## ملخص

على مر السنين، قد أجريت العديد من الدراسات حول المواد المركبة بسبب كثرة استخداماتها في العديد من المجالات وذلك لأسباب بيئية واقتصادية، الاتجاه الحديث للصناعة وضعنا مواد مركبة جديدة عززت مع الألياف الطبيعية مع الطبيعة القابلة للتحلل أو القابلة لإعادة التدوير. هناك الكثير من الألياف الطبيعية يمكن أن تستخدم لتعزيز المواد المركبة مثل الجوت والصابر، وأشجار النخيل، ... الخ. في هذه الدراسة، تم دراسة نسيج الجوت في اتجاهين في اتجاه العرض والطول من أجل تحديد خصائصها الميكانيكية (الانتقال، التشوه، والإجهاد، وحدة يونغ). وبالنظر إلى تشتت كبير من النتائج، يتم تقييم الخواص الميكانيكية (الإجهاد ومعامل يونغ) بواسطة الأسلوب الإحصائي وييل من ثنائي المعلمة. المادة اللاصقة البوليستر و المادة المركبة الجوت / البوليستر مصنوعة في شكل لوحات في المختبر ومن ثم تقسيمها إلى عينة وفقا لمعايير، ومن ثم اختبار لقوة الشد في الثني لاتجاه الطول والعرض.

# **Introduction Générale**

## Introduction Générale

Les matériaux eux-mêmes nous affectent peu, c'est la façon dont nous les utilisons qui influence notre vie, en effet, le développement et les changements rapides des produits, des pratiques technologiques et industrielles sont accompagnés par de nouvelles générations de matériaux. Parmi ces matériaux, les composites qui ne cessent d'évoluer vers des produits qui sont, soit de moindre coût possible, soit le plus performant ou bien les deux à la fois. De plus, dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique, les composites tendent à intégrer un caractère écologique. L'utilisation des matériaux naturels disponibles en Algérie pour le développement de l'industrie des composites.

Notre étude porte sur la conception et la caractérisation d'un nouveau matériau composite à base de jute/Polyester. Ce matériau composite peut à être utilisé dans les domaines de la construction, les prothèses, et du transport.

Ce travail est structuré en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présentons une étude bibliographique sur les matériaux composites (renforts et matrices). Ensuite prenant en considération le nouveau concept écologique dans l'élaboration des matériaux composites, nous présentons différents fibrenaturel pouvant être utilisés comme renforts.

- Le deuxième chapitre est consacré à la conception et à la caractérisation des composites stratifiés jute/polyester. Dans un premier temps, le renfort jute fin et gros est découpée dans les deux sens pour examiner l'influence de la découpe et le type de tissage sur les caractéristiques mécanique. La méthode d'élaboration des composites stratifiés adopté dans ce travail est le moulage par contact. De plus, dans ce chapitre est définit le protocole expérimentale et les conditions d'essais utilisé pour testés les tissus fibres en traction et les bio-composites ainsi que la résine polyester en traction et en flexion.

- Le troisième chapitre est consacré à la discussion de l'étude expérimentale.

## **Chapitre I**

# **Etude bibliographique**

## Introduction

Les bio-Composites à fibres naturelles sont (principalement) des composites dirigés par les prix des produits de base qui fournissent des propriétés structurelles utilisables à un coût relativement faible. L'utilisation des fibres naturelles présente de nombreux avantages tels que: matériau dérivé d'une ressource renouvelable, leur fabrication exige des faibles intrants énergétiques. Cependant, les fibres naturelles présentent également certaines caractéristiques indésirables par exemple l'absorption d'humidité élevée, une faible résistance thermique et des propriétés fortement anisotropes.

Les différents types de fibres naturelles comme le lin, le jute, de la banane, de palmier dattier, de coco et d'autres comme renfort possible ont été étudiés par plusieurs auteurs mais leurs propriétés restent encore mal connues.

Les propriétés des matériaux composites dépendent de la matrice, des fibres, et leur liaison interfaciale. L'adhérence entre les fibres de renfort et la matrice dans les matériaux composites joue un rôle important dans les propriétés mécaniques finales du matériau composite. Des méthodes variées comme les traitements par plasma, alcalin, thermique, greffage par copolymérisation, le traitement avec des silanes ou encore avec d'autres produits chimiques ont permis d'améliorer la compatibilité des fibres avec la matrice. L'ensemble de ces études montre que l'adhésion entre les fibres et la matrice joue un rôle primordial sur les propriétés mécaniques du composite. Il est donc indispensable de connaître les interactions chimiques de surface entre les différents constituants des composites avant de pouvoir réaliser une caractérisation mécanique de l'ensemble.

Le premier chapitre de ce mémoire de master est consacré à l'étude bibliographique de quelques travaux récents trouvés dans la littérature sur fibres naturelles et leur utilisation comme renfort pour les matériaux composites.

**Article I**

“Rokbi M., Osmani H., Imad A., Benseddiq N.”

**Effect of Chemical treatment on Flexure Properties of Natural Fiber-reinforced Polyester Composite .*Procedia Engineering*,2011; vol.10,pp.2092–2097.**

Effet du traitement chimique sur les propriétés en flexion du composite a renfort en fibre naturelle. *Procedia Engineering*, 2011; vol.10,pp.2092–2097.

**I.1. Résumé**

Rokbi *et al* [1], ont étudié l'effet des traitements chimiques sur les fibres naturelles d'alpha, extraites à partir du tenacissima de Stippa d'usine de la région de Hodna (Algérie), par l'alcalisation (traitement chimique) sur les propriétés en flexion des composites Alpha/polyester. Les fibres d'alpha sont soumises aux traitements par immersion dans une solution de NaOH à différent concentration 1, 5 et 10% pendant une période de 0, 24 et 48 h à 28 °C. Les composites fabriqué possèdent un taux de renforcement massique de 40 % des fibres d'alpha courtes orienté aléatoirement. L'influence des traitements alcalins sur les propriétés de flexion est étudiée pour déterminer les conditions optimales du traitement alcalin. Les résultats expérimentaux obtenus prouvent que le comportement des composites faits à partir des fibres traitées sont meilleur comparé à ceux non traité. Une fibre traitée par le NaOH avec une concentration de 10% pendant 24h permet de données les caractéristiques suivantes: contraint à la flexion et module de Yong améliorés respectivement de 23 à 57MPa et de 1,16 à 3,04 GPa. Cependant, une diminution des propriétés en flexion des composites après traitement chimique avec un traitement de NaOH 5% pour 48 h. Ceci est principalement dû à la réduction de la lignine qui lie les fibrilles de cellulose ensemble.

**I.2. Objectif visé par cet article**

Cet article [1] décrit la préparation des composites stratifiés polyesters/fibres d'alpha, traités par un alcalin et non traités, testés en flexion 3-points afin d'étudié le comportement et l'endommagement ces composites. Les effets de la concentration en NaOH (1, 5, et 10%) et

de la durée de l'immersion des fibres pendant 0, 24 et 48h ont été étudiés, et leurs effets sur la morphologie de la surface de la fibre et de la contrainte à la flexion du composite ont été analysés et discutés.

### I.2.1. Techniques et méthodologie adopté dans cet article

La fibre de alfa est collecté dans la région de Hodna-Algérie, la composition chimique de cette fibre est: 45% de cellulose, 25% pentozane, 23% lignine, 5% wax et 2% résidu. Dans cette étude la résine utilisé c'est une résine polyester commercial.

La fibre de alfa a été traité aux différentes concentrations (1, 5, 10%) de NaOH a la température ambiante de 28°C pour les durées de 24 et 48h, ensuite la fibre est émergée dans une solution d'acide sulfurique d'une concentration de 2% pondant 10min pour neutralisé le surplus de NaOH, et enfin la fibre a été rincé dans l'eau distille pour avoir un PH neutre Les différents composites élaborés dans cette étude sont présenté dans le tableau II. 1.

Tab.II.1.La fabrication de différents composites.

Composites	Fibre traité	Code
Composite 1	Non traité	T0000
Composite 2	01% NaOH à 24h	T0124
Composite 3	05% NaOH à 24h	T0524
Composite 4	10% NaOH à 24h	T1024
Composite 5	10% NaOH à 24h	T0548

Les composites sont désigné par Taabb, ou aa désigne la concentration en % du NaOH et bb la durée du traitement en heure.

### I.4. Résultat important dans cet article

#### I.4.1. Propriétés mécaniques en flexion

L'effet du traitement des fibres d'alpha sur les propriétés en flexion de la résine polyester renforcée par les fibres d'Alfa sont présenté dans la (Fig.I.1).

Les résultats prouvent que les propriétés mécaniques sont fortement changées avec le traitement des fibres. La contrainte à la flexion du composite T1024 a montré les meilleures propriétés de la résistance à la flexion d'une valeur de 57 MPa, ce qui correspond à presque 60% d'augmentation comparé au composite avec les fibres non traités T0000, alors que les composites T0124 et T0524 en permis seulement des augmentations d'environ 30% et 12% respectivement. Ceci peut être dû à l'amélioration de l'interface fibre/matrice de la composite fibre d'Alpha/polyester [2]. Dans la Fig.II. 1.a la contraint à la flexion du composite T0548 est

inférieure au composite T0000 d'environ 22%. Une dispersion remarquable dans les propriétés mécaniques trouvée pour le composite T0548, dont les fibres sont traitées pour la période la plus longue (48 heure). Mishra *et al* [3] a signalé que le composite de polyester renforcé de tissu de sisal traité au NaOH avec une concentration de 5% a eu une meilleure résistance à la traction que les composites traités au NaOH de 10%. Ceci est dû au fait que le traitement avec des concentrations élevées en alcali provoque une délignification excessive de la fibre naturelle conduisant ainsi à l'obtention de fibre plus faible ou endommagée. La résistance à la traction du composite diminue parfaitement après une certaine concentration optimale de NaOH.

Les courbes des essais de flexion trois points ont prouvé que les traitements des fibres d'alpha par un alcali ont également un effet significatif sur le module de flexion. Des histogrammes présentés dans (Fig.I.1a), il paraît clairement que le composite T1024 a montré l'amélioration la plus élevée de la contrainte à la flexion avec une augmentation d'environ 62% par rapport au matériau composite ayant des fibres non traité T0000. Cette augmentation remarquable du module de flexion peut être attribuée à une meilleure adhérence des fibres dans la matrice polyster.

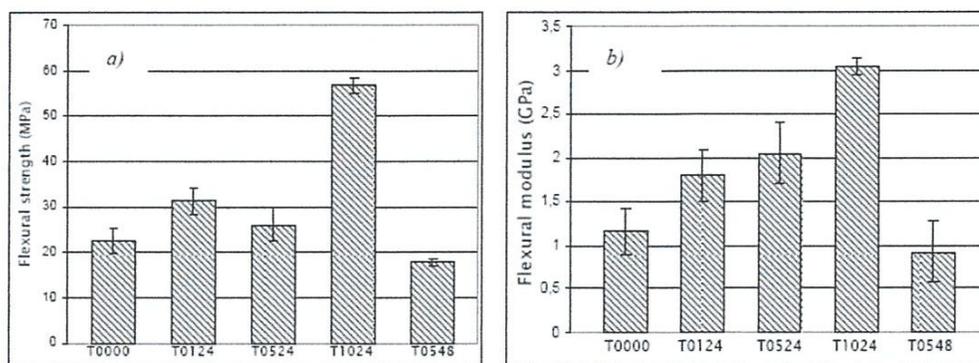


Fig.I.1. (a) Comparaison de la résistance à la flexion et (b) module de flexion des différents matériaux composites étudiés.

Dans la (Fig.I.1b) on a observé que le module de flexion du composite T0548 est inférieur d'environ 20% par rapport à celui au composite T0000 ayant les fibres non traités, par contre des améliorations de 45% et 55% sont enregistrés pour les composites T0124 et T0524 respectivement. Le module de flexion du composite alpha/polyester traités à 24h augmente avec l'augmentation des concentrations de NaOH Fig. 1.1b. Par contre, ce module

diminue avec l'augmentation de la durée du traitement de 24 à 48 pour le cas des composites T0524 et T0548.

### **I.5. Conclusion**

L'alcalisation de fibres d'alpha améliore la qualité de l'interface de fibre/matrice. Les résultats d'essai de flexion ont prouvé que la concentration en NaOH utilisée et la durée du traitement à un effet significatif sur les propriétés mécaniques des composite renforcés par des fibres d'alpha. L'alcalisation des fibres d'alpha par le NaOH d'une concentration de 10% à un durée de 24 heures a mené à l'amélioration de la contraint et le module de Yong en flexion respectivement environ 60% et 62%. Cependant, le traitement des fibres sur une période prolongée (48h) rend les fibres plus raides et plus fragiles. Les résultats de cette étude suggèrent que les fibres d'alpha soient comparables à d'autres fibres naturelles utilisées comme renfort dans les matrices polymère. Ces fibres sont complètement appropriés pour être utilisé comme renfort dans les bio-composites.

Article II

“. AlMaadeed M.A., Kahraman R., Khanam P.N., Madi N.”

**Date palm wood flour/glass fiber reinforced hybrid composites of recycled polypropylene: Mechanical and thermal properties.** *Materil and Desig*, 2012;vol.42 pp. 289–294

Composite hybride RPP/renforcé par la farine du bois/fibre de verre : Propriétés mécanique et thermique, *Materil and Desig*, 2012;vol.42 pp. 289–294.

**II.2. Résumé**

AlMaadeed *et al.* [4], on fait une étude sur la Polypropylène recyclé (RPP) composés hybrides basés sur le bois de palmier dattier farine/fibres de verre préparés par différents rapports de ces deux renforts. Le procédé de mélange est réalisé dans une extrudeuse et les échantillons ont été préparés par la machine de moulage par injection. Les propriétés du PP recyclés ont été améliorées par le renforcement de la farine de bois de palmier. La résistance à la traction et le module de Young du RPP renforcé par la farine de bois en augmenté encore par l'addition des fibres de verre. Les composites renforcés de fibre de verre ont une dureté plus élevée que les autres composites. Des études morphologiques indiquent que la fibre de verre présente une bonne adhérence avec PP recyclé, améliore les propriétés mécaniques des composites hybrides avec l'addition de fibres de verre. Addition de 5% en masse des fibres de verre à la farine de bois renforcé RPA permet une augmentation de la résistance à la traction d'environ 18% par rapport à celle de la farine de bois seul. Une augmentation de la teneur en particules de bois dans le PP conduit à une diminution du degré de cristallinité du polymère. La résistance à la traction des composites augmente avec l'augmentation du pourcentage de cristallinité en ajoutant de la fibre de verre. L'amélioration des propriétés mécaniques avec l'augmentation du pourcentage de cristallinité (et avec la diminution de l'épaisseur lamellaire) peut être attribué à la région limitée entre les lamelles car l'agglomération est absent dans ce cas.

## II.2. Objectif visé par cet article

Dans cette étude [4] la fibre de verre à été utilisé comme renfort pour la fabrication des composites hybrides pour améliorer les propriétés du composites constitué de PP recyclés et de la farine de bois du palmier dattier. L'utilisation de la fibre de verre en renfort avec plancher de bois en PP recyclé est moins coûteuse que le composites RPP renforcée par la fibre de verre. Les composites renforcés de fibres de verre ont été largement utilisés dans les industries de l'automobile et de l'aérospatiale en raison de leur haute résistance et leur faible masse. En dépit des travaux publiés dont beaucoup sont fondés sur les composites à fibres de palmier dattier, aucune recherche n'a été signalé sur les composites à base de PP recyclé palmier dattier en fibres de bois farine/verre hybrides. Dans le présent travail, nous avons préparé les recyclés à base de polypropylène palmier dattier composites en fibres de bois farine / verre hybrides à des compositions différentes. Ainsi, l'objectif de la présente étude est d'utiliser des produits recyclés dans les matériaux composites et de développer des composites hybrides de PP recyclé en ajoutant des produits en verre et en fibres de bois local. Ces préparés recyclés composites hybrides sera plus économique que pures composites en fibre de verre.

## II.3. Résultat important dans cet article

### II.3.1. Propriétés de dureté

Les différents types de composite fabriqué sont présenté dans le Tableau II.1.

Tab II.1: Codes et composition des composites en bois et de fibres de verre.

Code	Bois (%)	Fibre de verre (%)	RPP (%)
WRPP	30	0	70
GFRPP	0	30	70
WGRPP1	25	5	70
WGRPP2	20	10	70
WGRPP3	15	15	70
WGRPP5	5	25	70

W: Farine de bois de palmier dattier

GF: Fibre de verre

RPP: Polypropylène recyclé.

Dans cette étude six types de composite stratifiés sont été préparés constitué de différents pourcentage de polypropylène recyclé (RPP) renforcé par la farine de bois, avec ou sans un certain pourcentage de fibre de verres.

Les propriétés de dureté des matériaux composites et hybrides RPP sont présentées sur la Fig.II.2. Les résultats indiquent que le pur composite RPP renforcé par la fibre de verre a une dureté plus élevée que les autres composites et la farine de bois composites renforcés montrent une dureté inférieure à celle d'autres matériaux composites. Comme présenté dans la Fig. II.3 et comme prévu, les résultats des tests de dureté ont une tendance similaire à celle de la résistance à la traction. Les résultats indiquent clairement les différentes combinaisons de fibres de verre et le bois ont environ la même quantité. Tasdemir *et al.* [8] ont indiqué que, une augmentation de la dureté des matériaux composites avec une augmentation de la teneur en fibres. Macro Valinte *et al.* [9] ont rapporté que la dureté de la matrice polymère se trouve à augmenter légèrement avec un contenu en fibres de bois augmente à la fois pour le LDPE et PP. La fibre de verre entraîne la nouvelle amélioration de la dureté à des températures élevées.

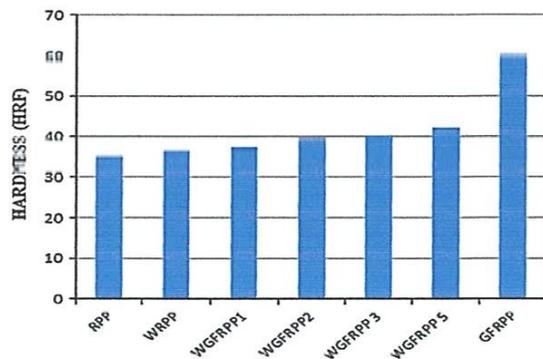


Fig. II.2. Dureté des composites RPP renforcés par la farine de bois avec ou non de la fibre de verre.

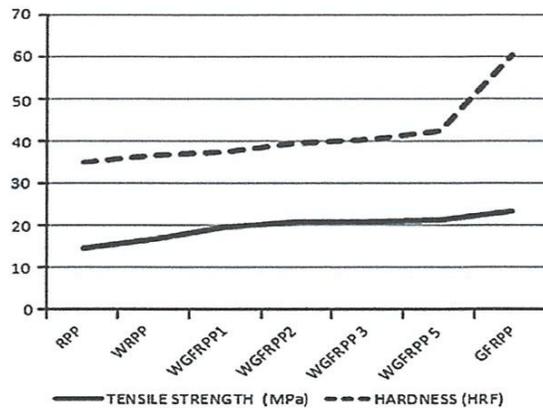


Fig. II.3. Relation entre la dureté et la résistance à la traction.

Les résultats de l'indice de fluidité (MFI) sont présentés dans la Fig.II.4. L'indice de fusion augmente par le rajout de la farine de bois et il diminue par le remplacement de la farine de bois avec des fibres de verre. En effet, de haut poids et l'effet de la taille des particules de la fibre de verre qui augmente la viscosité du composite. Généralement par

l'addition de fibres de la matrice, la valeur de l'indice de fluidité à chaud est réduite, car la grande taille des particules de la fibre. Les mêmes résultats ont été observés par de nombreux chercheurs [10]. Tasdemir *et al.* [8] préparé le LDPE et composites à fibres PP-bois et ils ont signalé que l'indice de fluidité à chaud diminue avec l'augmentation de la concentration de farine de bois. Son *et al.* [11] ont rapporté que l'indice de fluidité à chaud diminue avec l'augmentation du contenu de boues de papier.

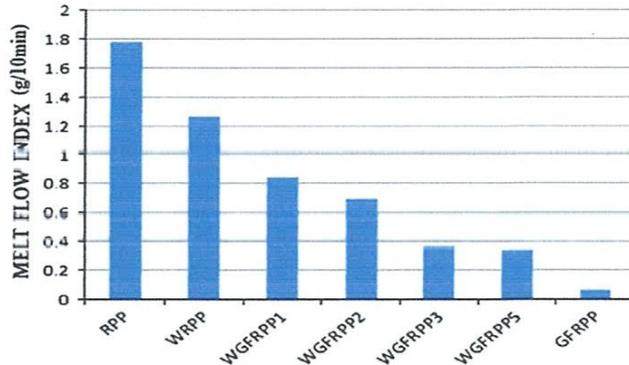


Fig. II.4. L'index de fusion des différents composites RPP renforcé par la farine de bois avec ou sans fibre de verre.

## II.4. Conclusions

Les composites à base de polypropylène recyclé (RPP) renforcé en farine de bois/verre hybrides ont été préparés avec différents pourcentages des constituants. Les résultats ont montré que les propriétés de traction du RPP ont été augmentées par l'ajout de farine de bois. En outre, la résistance à la traction de la farine de bois renforcé de polypropylène recyclé a augmenté de façon significative par l'ajout de fibres de verre dans les composites hybrides aussi peu que 5% en masse. Les composites renforcés de fibres de verre a des propriétés de dureté plus élevés que les autres composites. Par incorporation de fibres de verre dans les matériaux composites, les propriétés de dureté ont été améliorées. Des micrographies MEB, la fibre de verre inférieure et retirer la rupture a été observée, indiquant que la fibre de verre présente une bonne adhérence à la matrice. Il peut également être conclu que l'utilisation de la farine de bois à un certain pourcentage avec la fibre de verre renforcée composites hybrides réduira le coût des matériaux sans altérer les propriétés de manière significative. Les composites à base de thermoplastiques recyclés et les déchets agricoles fournissent une occasion unique pour le recyclage et de réduire les coûts par rapport à la production de composites en fibre de verre pur.

**Article III**

“. Arrakhiz F.Z., AchabyM.El., MalhaM., Bensalah M.O., Fassi-Fehri O., Bouhfid R.,  
Benmoussa K., Qaiss A.”

**Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites:  
Doum/low density polyethylene, *Materials and Design*, 2013; vol 43 pp 200–205**

Propriétés mécanique et thermiques des composite en polymère a renfort en fibre naturelles :  
polyéthylène a faible densité/Doum, *Materials and Design*, 2013; vol 43 pp 200–205

**3.1. Résumé**

Les matériaux composites à base de fibres végétales est un domaine intéressant pour plusieurs chercheurs et industriels, cependant, ces matériaux rencontrent le problème de compatibilité entre les fibres et la matrice polymère. Arrakhiz, [12], ce sont intéressé aux propriétés mécanique et thermiques et à la caractérisation du composite polyéthylène à faible densité (LDPE) renforcé en fibre naturelle de Doum aux différentes fractions massiques (5, 10, 15, 20, 25 and 30 %). Ensuite les fibres de Doum en été traité par NaOH (alcalin) pour nettoyer la surface de fibre et pour améliorer l'adhérence de composite polymère/fibres. Les résultats obtenus des propriétés mécaniques des composite aux différentes fractions montre une amélioration des propriétés ; une augmentation du module de Young de l'ordre de 145% (pour la fraction de 30%) comparé au polymère ordinaire (LDPE), augmentation dans le module de flexion de 135% (pour la fraction de 20%) et un gain de 97% dans le module de torsion à 0,1 Hz. les propriétés thermiques ont été évaluées et les résultats montrent une diminution des propriété avec l'augmentation de la fraction des fibre de Doum.

**3.2. Objectif visé par cet article**

La fibre de Doum possède une bonne résistance utilisée auparavant à la fabrication des cordes des tapées et dans l'industrie des papeteries, mais aussi dans un contexte de valorisation des fibres trouvées en abondances au Maroc. Dans cette étude la fibre de Doum a été traité par le NaOH avant d'être utilisée a différente fraction massique pour renfort a des composites stratifiés, pour évaluer leurs propriétés mécaniques et thermique.

### III.3. Techniques et méthodologie adopté dans cet article

#### III.3.1. Matériau

Le LDPE (polyéthylène à faible densité) utilisé comme une matrice est de type Riblene MP 31 polymère européen de la France d'une densité environ  $0,924 \text{ g/cm}^3$  a une température de fusion de  $109,8$ . La fibre de Doum (*Chamaerops humilis*) non traité possède une longueur environ 25 cm collecté au Maroc.

#### III.3.2. Préparation des échantillons

##### III.3.2.1. Traitement de la fibre de Doum

Pour améliorer l'adhésion fibre/matrice, la surface de la fibre de Doum a été traitée avec  $1,6 \text{ mol/l}$  de NaOH pour une durée de 48 h, ensuite la fibre est rincée dans une solution de acétique acide (100 ml) pour neutralisé le surplus de NaOH présent dans la fibre. Enfin la fibre est lavée et séchée à l'air pour 24h.

##### III.3.2.2. Elaboration des composites

Le bio-composites Doum/ LDPE a été fabriqué avec le polymère sous forme de grain aux différents pourcentages (5, 10, 15, 20, 25, 30%) de la fibre de Doum, utilisant une extrudeuse.

#### III.3.3. Caractérisation

##### III.3.3.1. Analyse ATR-FTIR

Le spectre de la transformée de Fourier à infrarouge des bio-composites a été détecté en utilisant *ABBBomem FTLA 2000-102* spectromètre (ATR:SPECACGOLDENGATE) le spectre est obtenu par accumulation de 16 scans avec une résolution de  $4\text{cm}^{-1}$ .

##### III.3.3.2. Analyse thermogravimétrique (TGA)

La température de la décomposition du polymère et de la fibre est évaluée par l'analyse thermogravimétrique (TGA) utilisant Q500 instrument de TA Instruments. La masse de l'échantillon utilisée est égale à 11 mg, l'échantillon est chauffé de 24 à  $600^\circ\text{C}$  avec une vitesse d'essai de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  pour rapporter la température de début de la décomposition, la perte de masse et la décomposition de maximum font une pointe.

##### III.3.3.3. Scanneur Différentielle de Calorimétrie (DSC)

### III.4.2. Stabilité thermique des composites de Doum

La stabilité thermique de LDPE pur et les matériaux différents composites mesurés par TGA sont présentés dans la Fig.III.2.

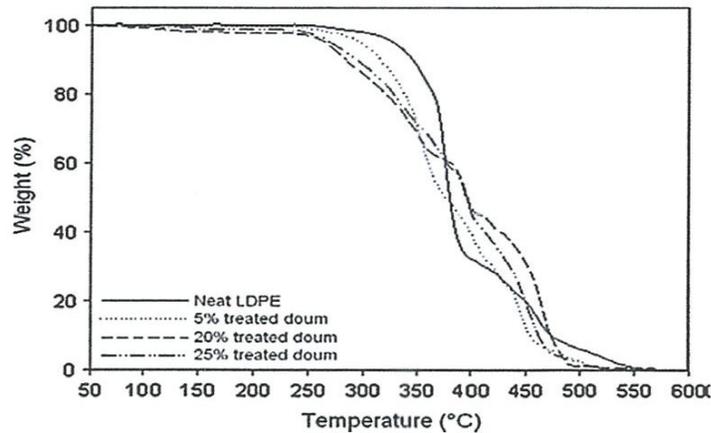


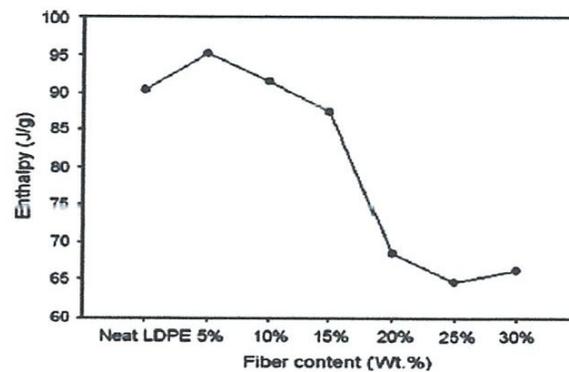
Fig.III.2. Résultats TGA pour différent composite constitué de la fibre de Doum traité avec différents pourcentage de NaOH et une matrice de LDPE.

On peut voir que les composites présentent une légère diminution de la masse dans l'intervalle de températures de 100-150 °C par rapport aux LDPE pur. Cela pourrait s'expliquer par la présence de l'eau résiduelle dans la fibre de Doum qui est libérée progressivement au-dessus de 100 °C. Il est également constaté que l'addition de la fibre diminue la température de début de dégradation thermique par rapport à LDPE, cet effet étant relié à la charge des fibres. Cela indique que l'ajout de fibres réduit la stabilité thermique globale de la matière [18]. Il a été observé au cours des procédés d'extrusion et de moulage des composites qui sont nettement moins visqueux que la matrice pur LDPE en raison de la teneur en fibres. Le cisaillement et les frottements entre les fibres de Doum et la matrice LDPE au cours de ces étapes sont considérées comme suffisamment forts pour briser les liaisons chimiques du LDPE, provoquant ainsi un changement dans les propriétés de la matrice [18].

### III.4.3. Propriétés thermiques des composites a renfort en fibre de Doum

À partir de la mesure DSC, l'enthalpie de fusion a été calculée, et montre une légère augmentation seulement pour les composites d'une teneur en fibres de 5% suivie d'une diminution significative pour la teneur en fibres de 30% (Fig. III.3) par rapport à la mesure

d'enthalpie de LDPE pur. En général, les chaînes moléculaires du LDPE peut être cristallisé par eux-mêmes par un effet d'auto-nucléation [19] ou en introduisant un agent de nucléation (effet de nucléation hétérogène) [20]. Se référant à la Fig. III.3, le pic de fusion devient large quand LDPE est rempli avec 5% de fibres de doum, par rapport aux LDPE, il y avait plus de cristallinités formées dans des composites LDPE/5% en fibres en raison du rôle des fibres naturelles comme agent de nucléation. Qui déclenchent la germination et la croissance des sphérolites.



FigIII.3 .La variation de l'enthalpie en fonction de la fraction massique des fibres de Doum dans la matrice LDPE.

### III.4.4. Propriétés en traction des composites a renfort en fibre naturelle

L'ajout de la fibre de Doum à la matrice LDPE a entraîné des modifications des propriétés mécaniques. L'augmentation de la teneur en fibres de 0 à 30% a abouti à un redoublement du module d'Young, de 197 MPa de LDPE pur à 482 MPa lorsque la fibre est ajouté jusqu'à 30%. Une légère augmentation du module peut être observée lorsque la charge des fibres est augmentée de 0 à 10%. Au-delà de 10% de la teneur en fibres, le composite présente une forte augmentation du module a un chargement de fibre jusqu'à 30% (Fig.III.4). L'amélioration significative du module de traction a été obtenu lorsque en augmente la teneur en fibres [21-22-23]. Les Fibres traitées peuvent présenter de plus grandes interactions avec la matrice polymère, ce qui entraîne une bonne distribution de la charge dans le composite. Ce qui améliore la rigidité du composites.

Un autre résultat observé c'est la diminution progressive de la résistance à la traction avec l'augmentation de la fraction massique des fibres dans le composite (Fig.III.5). Ceci pourrait être expliqué par la longueur de la fibre de Doum et la décohésion entre la matrice et les fibres en situation de stress (contrainte). Cette décohésion génère une concentration de

contraintes qui accélère la rupture de l'échantillon. Il est normal que l'ajout de fibres qui a un caractère fragile de diminuer l'allongement à la rupture. En outre, la diminution observée de l'allongement à la rupture peut être attribuée à une réduction de la capacité de déformation de l'interface rigide entre les fibres et la matrice [22].

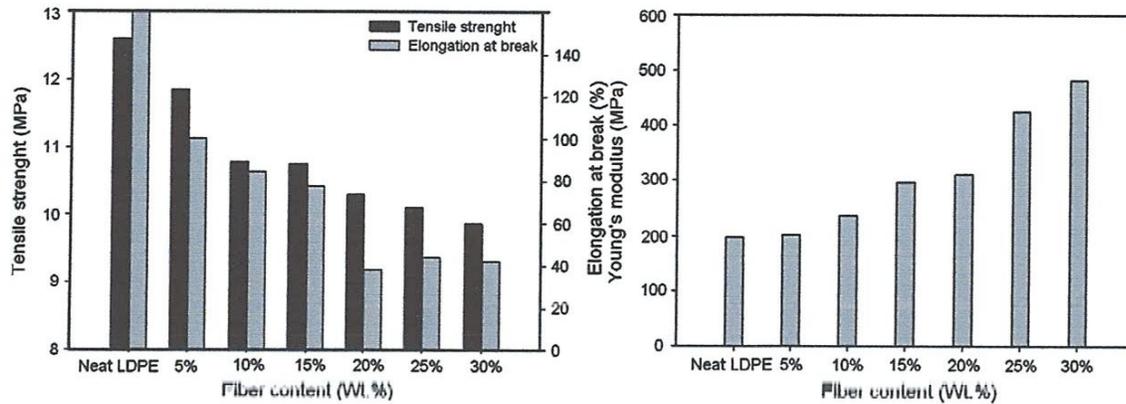


Fig.III.4. Propriété mécaniques en traction des composite élaborées aux différentes fractions massiques de fibre.

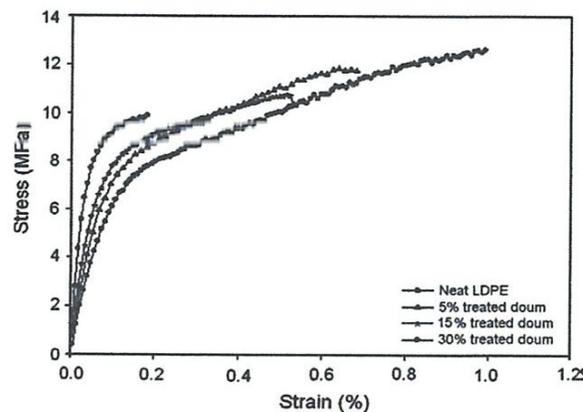


Fig.III.5. Courbe type en comportement contrainte/déformation du LDPE pur et des composites fabriqués.

### III.4.5. Propriétés de flexion des composites a renfort en fibre naturelle

Le module de flexion du composite LDPE/Doum est montré dans la (Fig.III.6). Le module de flexion a augmenté régulièrement en fonction de la teneur en fibres de 0.0% à 20%. Mais, avec la teneur en fibres de 25%, ils sont baissés légèrement ou presque restent constants. Cette augmentation peut être expliquée par une meilleure interaction fibres/matrice dans le cadre des contraintes de compression lors de la flexion, développé dans la section transversale des éprouvettes de flexion, quelle qu'en soit l'état de surface des fibres [24]. Le module de flexion du composite montre une teneur en fibres optimale. En général, la teneur en fibres optimale varie en fonction de la nature des fibres et de la matrice, les proportions des

fibres, adhérence fibres/matrice inter-faciale, agglomération des fibres, les techniques de transformation, etc. [25]. Dans d'autres études, il a été constaté que la teneur en fibres optimale varie entre 17% et 25% pour la fibre de coco/LDPE [26]. Et également pour les composites à 25% en fibre de coco/polyester [27]. Dans ce travail, 20% en teneur de fibre de Doum était le pourcentage optimal qui donne les meilleurs modules de flexion.

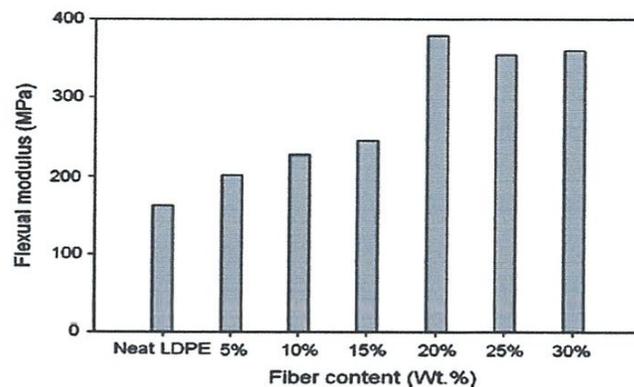


Fig.III.6. Module de flexion des composite fabriqués.

### 3.5. Conclusion

L'objectif dans cette étude est de définir les avantages du renfort en fibre naturelle telle que les fibres de Doum avec le polyéthylène à faible densité. Pour améliorer les propriétés d'adhérences des fibres, elles ont été traitées avec le NaOH pour les blanchir et les nettoyer. Tous les échantillons ont été préparés dans une extrudeuse à double vis et injecté dans une machine de moulage par injection. Après addition des fibres de Doum, une croissance significative dans le module de Yong en traction, flexion et dans le module de torsion. L'analyse thermique a montré la légère diminution des propriétés du polymère (matrice), la cristallinité et la fusion de composites sont principalement influencées par le chargement des fibres naturelles.

**Article IV**

“Abu-Sharkh B.F., Hamid H.”

**Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis.** *Polymer Degradation and Stability*, 2004; vol. 85 pp 967-973.

Etude de la dégradation du composite a renfort en fibre de Palier/polypropylène dans les conditions naturelles et artificielles: Analyse mécanique et thermique. *Polymer Degradation and Stability*, 2004; vol. 85 pp 967-973.

**VI.1. Résumé**

Abu-Sharkh [28], le composite polypropylène (pp) renforcé par les fibres de palmier dattier ont étaient stabilisés par UV pour former les composites. La stabilité des matériaux composites dans les conditions naturelles d'altération de l'Arabie saoudite et dans les conditions atmosphériques accélérées ont été étudiée. Les composites ce trouve beaucoup plus stable que le PP sous les sévères conditions atmosphériques naturelles de l'Arabie saoudite et dans les essais accélérés de vieillissement. La Compatibilités des échantillons sont généralement moins stables que les incompatibles en raison de la faible stabilité de polypropylène mallé. Irgastab et Tinuvin se trouvent être des stabilisateurs efficaces pour les composites PP/fibres de cellulose. En plus l'augmentation de la stabilité donnée par la présence des fibres dans les matériaux composites, résultant l'adhésion inter-faciale de l'oxydation de la matrice polymère peut être la source de rétention de la résistance mécanique.

**VI.2. Objectif visé par cet article**

L'objectif dans ce travail [28], est d'étudier la dégradation et la stabilisation des composites polypropylènes renforcé par des fibres de cellulose de palmier dattier sous condition atmosphérique naturelle et artificielles dans l'Arabie Saoudite. Des grands nombres de fibre de palmier de datte sont produits en Arabie Saoudite en raison du processus d'élagage annuel des arbres. La contrainte mécanique et la température de fusion ont été utilisées comme mesures du niveau de la dégradation dans les composites.

### VI.3. Techniques et méthodologie adopté dans cet article

#### VI.3.1. Caractérisation

Les matériaux composites exposées aux conditions naturelle et artificielles ont été caractérisés mécaniquement tels que contrainte et la déformation a la rupture. Les échantillons ont été testés on utilisant une machine d'essai Instron 5560. Les essais ont été effectués avec une vitesse de déformation constante 2 mm/min. Les températures de fusion des échantillons ont été caractérisées utilisant un instrument type Perkin-Elmer DSC. Les échantillons en une masse de 10 mg. La température ambiante de chaque balayage était 190 à 50°C et le taux de refroidissement étaient fixes à 10°C/min.

#### VI.4. Résultats importants dans cet article

La figure.VI.1 montre les températures de fusion DSC des échantillons en condition naturelle en fonction du temps. L'échantillon de polypropylène et les échantillons du composites compatibles subit une dégradation sensible par rapport aux échantillons incompatible. Le composite incompatible à une bonne stabilité est pue de température de fusion de pp. L'échantillon de PP montre une baisse constante de la température de fusion tandis que l'échantillon compatible montre une chute brutale après 6 mois d'exposition. Cela indique que les stabilisateurs ont réussie à stabiliser le composite compatible pendant les 6 premiers mois, cependant, le taux initial d'appauvrissement de la stabilisation est plus élevé que celui dans les échantillons de PP. Cela indique que PP (E-43) brouillé contient des groupes qui sont plus sensibles à l'oxydation que le PP. La comparaison de la stabilité du PP et le composite incompatible indique que la présence de fibres ligne-cellulosiques donne une stabilité au composite. Ceci peut être dû à la présence d'antioxydants naturels, par exemple la lignine, qui est connue pour stabiliser les fibres naturelles.

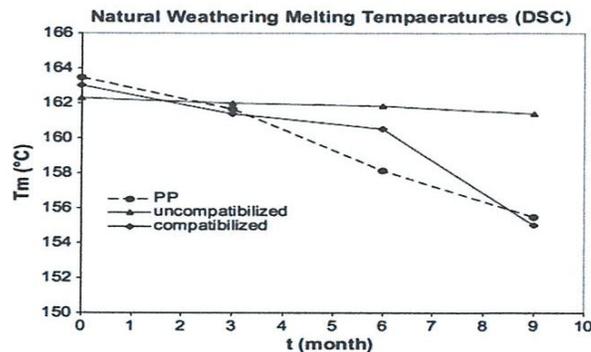


Fig.VI.1. DSC de la température de fusion des échantillons exposés aux conditions naturellement en fonction du temps d'exposition.

La transformation et la présence de fibres naturelles à mener les échantillons à se décolorer et devenir brunâtre. La couleur sombre et la couche de surface des fibres peut aussi agir comme une couche protectrice qui empêche le rayonnement UV de pénétrer dans l'échantillon et provoquant une dégradation dans la masse. Une troisième cause de stabilisation peut être la plus grande proportion de stabilisateur présente dans les échantillons des composites PP par rapport aux échantillons de PP. Bien que la fraction massique du PP dans le composite est d'environ 67% de celle présente dans l'échantillon PP, la quantité de stabilisant utilisé dans les deux échantillons était la même.

La figure VI.2 montre les températures de fusion DSC des l'échantillon exposée aux conditions artificielles en fonction du temps d'exposition. Dans ce cas, le PP est plus moins stable que les deux échantillons compatible et incompatible. La température de fusion du PP a chuté de 164 à 138°C après 800 heures d'exposition, puis a continué à diminuer à un rythme plus lent. Les échantillons compatibles et incompatibles présente des stabilités similaires et leurs températures de fusion ont montré une diminution de 5%. La forte baisse initiale de la température de fusion de l'échantillon de PP peut être causée par l'appauvrissement d'une grande partie du stabilisateur pendant le processus de préparation de l'échantillon, ce qui implique une extrusion initiale, la granulation, puis le moulage par injection. La plus grande stabilité affichée par l'échantillon compatible dans le vieillissement artificiel par rapport au vieillissement naturel peut être attribué au fait que la source de rayonnement ultraviolet dans l'appareil de mesure météorologique accéléré ne peut pas reproduire le spectre de la lumière produite par le rayonnement solaire. En outre, il est possible que le polypropylène brouillé soit sensible à la dégradation par des fréquences de rayonnement qui sont plus présent dans le rayonnement solaire. Une tendance similaire aux échantillons naturellement vieilli est observée ici. Les échantillons de PP montrent une forte baisse de la souche indiquant la grande fragilisation résultant de la réduction du poids moléculaire. Les échantillons incompatibles et compatibles montrent une chute et très peu de souche. Encore une fois, le mécanisme de rupture différent et l'éventuelle adhésion renforcée peut être la cause principale de la souche presque constante à la rupture des échantillons du composites.

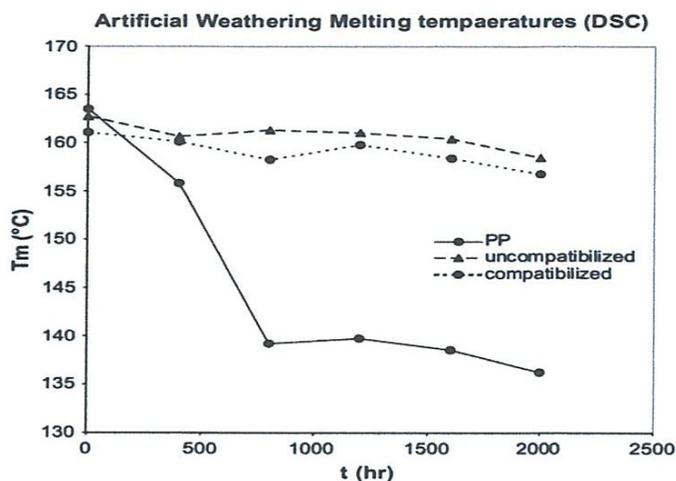


Fig.VI.2. DSC de la température de fusion des échantillons exposés aux conditions artificiel en fonction du temps d'exposition.

### VI.5.Conclusions

Les composites PP/cellulose en fibres de palmiers de datte se trouvent plus stable que le PP sous les sévères conditions atmosphériques naturelles de l'Arabie saoudite et dans les essais de vieillissement accélérés. En outre, les échantillons compatibles sont généralement moins stables que l'incompatibles en raison de la faible stabilité du polypropylène. Irgastab et Tinuvin s'avèrent efficaces pour un stabilisateur des composites polypropylènes PP en fibres de cellulose. De plus, les échantillons compatibles sont généralement moins stables que les incompatibles en raison de la faible stabilité de polypropylène brouiller.

**Article IV**

“Alawar A., Hamed A M., Al-Kaabi K.”

**Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement**

*Composites: Part B, 2009;vol.40 pp 601–606.*

Caractérisation des fibres des Palmier dattier traité en renfort pour les composite. *Composites: Part B, 2009;vol.40 pp 601–606.*

**VI.1. Résumé**

Alawar *et al.* [29], ont étudié l'effet de différent traitement sur la fibre de (DPF). La DPF brut a subi différentes méthodes de modification du surface telle que le traitement alcalin (NaOH) pour différentes concentrations 0.5, 1, 1.5, 2.5 et 5%, et traitement par l'acide (HCL) pour les concentrations 0.3, 0.9 et 1.6 N. Tous les traitements ont été effectués à la température de 100°C pendant 1 h. La morphologie de surface, l'analyse gravimétrique thermique (TGA), spectre de la transformée de Fourier infrarouge (FTIR), les propriétés mécaniques et les analyses chimiques, des fibres traité de DPF ont été étudiés. L'échantillon traité par NaOH d'une concentration égale 1% montre des propriétés mécaniques importantes. Le traitement par l'acide chlorhydrique a entraîné une détérioration des propriétés mécaniques.

**IV.2. Objectif visé dans cet article**

Cette recherche vise à étudier [29], l'effet des méthodes de traitement alcalins et acétylations sur le comportement de DPF. Les Différentes propriétés telles que la morphologie de surface, stabilité thermique, spectroscopie infrarouge et les propriétés mécanique sont étudiées.

### IV.3. Techniques et méthodologie adopté par cet article

#### IV.3.1. Morphologie de surface

##### IV.3.1.1. Le palmier dattier

Le palmier dattier "DP" (Fig.IV.1) est un membre de la famille des palmiers (*Phoenix dactylifera*), se trouve normalement dans le Moyen-Orient, Nord du l'Afrique, les îles Canaries, en Inde au Pakistan, et aux Etats-Unis (Californie). Il est plus de 100 millions de palmiers dattiers dans le monde et chaque arbre peut atteindre plus de 100 ans d'existence [30]. L'avantage de la "DP" ne se limite pas à son peuple. Ils ont utilisé différentes parties de cet arbre dans les différentes applications de la vie quotidienne. Tels que des cordes et des paniers. La tige de palmier est recouverte d'un tissu constitué de fibres individuelles. Généralement, ces fibres créer une natte tissée de fibres naturelles croisés de diamètres différents. Traditionnellement, le tapis est enlevé par an des arbres et nettoyé pour faire des cordes. Cependant, ces applications représentent un faible pourcentage de la production totale. La possibilité de trouver une utilisation pour DPF dans la fabrication des composites aidera a ouvrir de nouveaux marchés pour ce qui normalement considéré comme un déchet ou utilisé dans les produits de faible valeur. L'utilisation de fibres entourant la tige de palmiers dattier comme renfort dans les matériaux à matrice polymère a été rapportée dans quelques études [31, 32, 33,29].

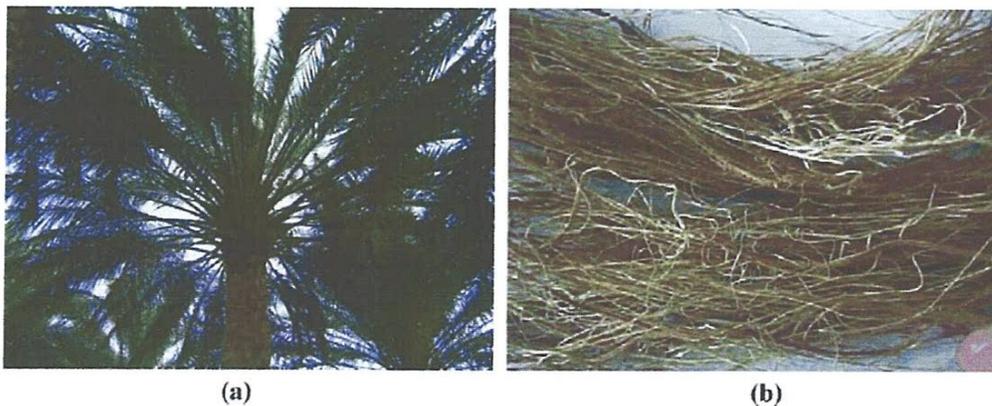


Fig.IV.1. (a) Palmier dattier et (b) fibres de palmier dattier d'arbres qui entourent les tiges.

#### IV.3.1.2. La fibre non traitée

La DPF brut est de forme cylindrique et la surface de la fibre contient un grand nombre de fibres non terminées cultivées et des impuretés, comme le montre la (Fig.IV.2) [32].

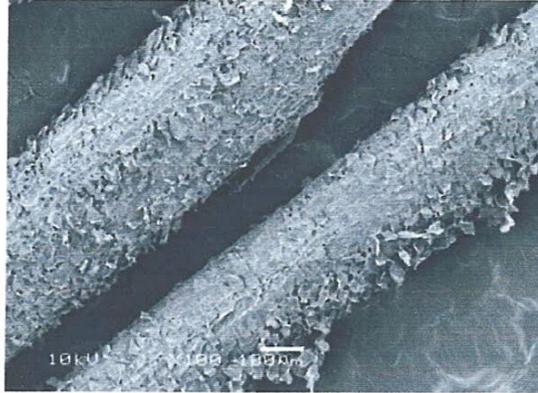


Fig.IV.2. Observation en MEB de la morphologie des fibres DPF non traitée.

### IV.4. Résultats importants dans cet article

#### IV.4.1. Morphologie de la surface

La Micrographies en MEB montre une amélioration de la morphologie de la surface après l'application du traitement à la soude. Cette amélioration peut être vue dans la (Fig. IV.3). La Micrographies en MEB montre que l'utilisation du traitement à la soude nettoie la surface des fibres d'une grande quantité d'impuretés et la fibrillation causes, est aussi que l'augmentation de la concentration de la soude, augmente le nombre de pores sur la surface de la fibre. Cela peut être attribué à la rigidité de la réaction qui augmente avec la concentration de la soude.

Les propriétés mécaniques de la DPF avant traitement et après traitement par différentes concentrations de NaOH sont représentées à la Figure IV.3. L'amélioration de la résistance à la traction du DPF a été observée lorsque le traitement par soude a été appliqué. La résistance à la traction maximale a été signalée à un traitement par concentration de 1% de NaOH lorsque, la concentration de la soude augmente. La fibre devient plus propre de ses impuretés et les fibres cultivées incomplètes. Ceci améliore la résistance à la traction de la fibre brute avec des traitements de 0,5% et 1% de NaOH à dépasser en moyenne 800 MPa.

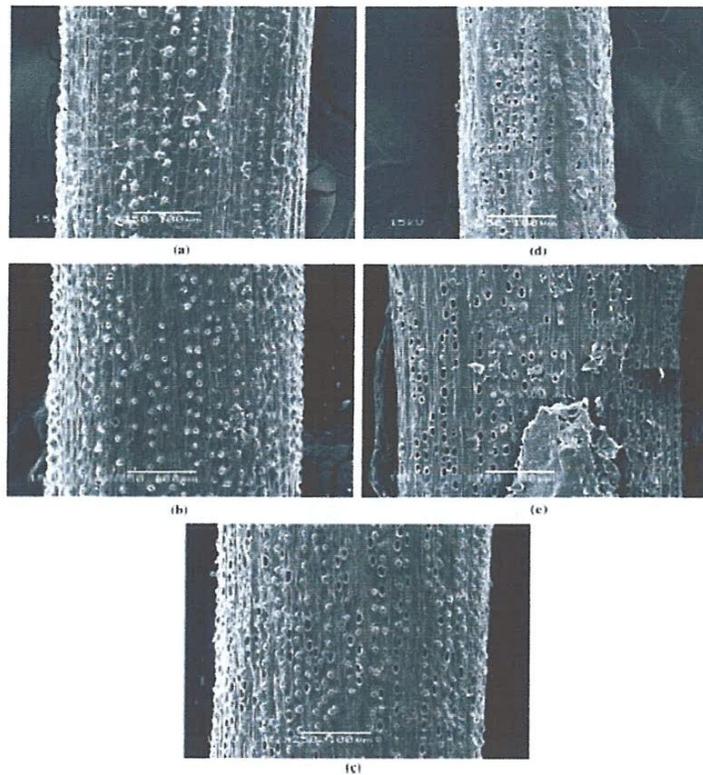


Fig.IV.3. Observation en MEB de la DPF traité avec (a) 0,5%, (b) 1%, (c) 1,5%, (d) 2,5 et (e) 5% de NaOH.

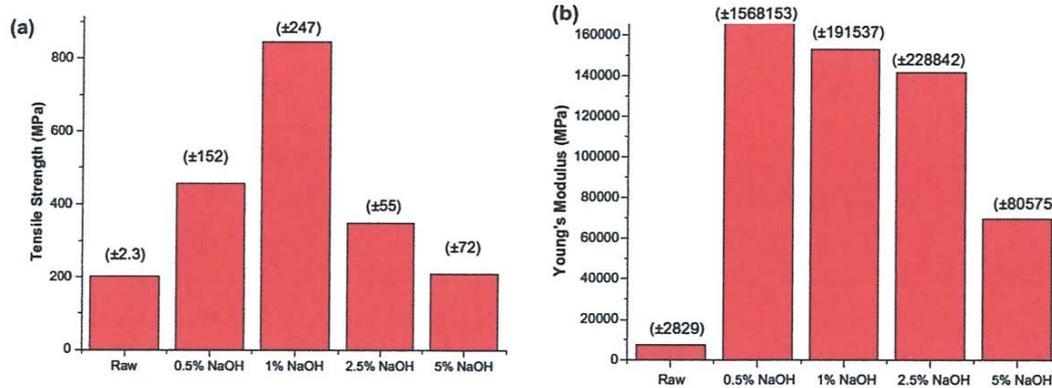


Fig.IV.3. (a) Effet du traitement par NaOH sur la résistance à la traction et (b) module de Young de DPF.

#### IV.4.1. Analyse thermique

La figure IV.4 montre l'analyse thermique des fibres de DP non traitées et traité avec le soda. Le traitement par le soda est bien connu pour éliminer les impuretés naturelles et artificielles, produisant une topographie de surface rugueuse et de faire la fibrillation de fibres [35]. De plus, le traitement de bicarbonate est connu pour améliorer la résistance thermique des fibres naturelles [36].

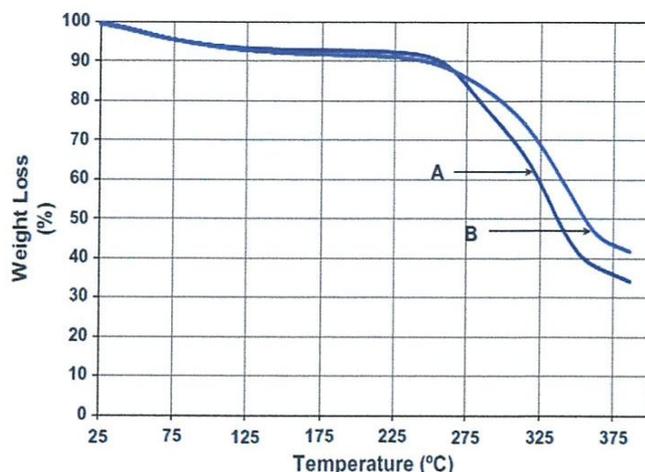


Fig.IV.4. Courbes thermogravimétriques (TG) (A) fibre non traité et (B) fibre de palmiers dattier traité en 5% de NaOH.

#### IV.4.2. Les transformées de Fourier FTIR

FTIR peut donner une indication rapide et qualitative sur l'évolution de la structure chimique. Les spectres des fibres traités et non traité avec la soude qui est représenté dans la figure IV.5. La large bande d'absorption dans la région autour de  $3500\text{cm}^{-1}$  pu être attribuée en a la band de l'hydrogène O-H s'étendant et on été observé dans les deux spectres, où le pic résultant de la vibration maximal d'environ  $2900\text{cm}^{-1}$  attribué au CH. La bande d'absorption dans la région attribuée au groupe carbonyle (C=O) d'environ  $1740\text{cm}^{-1}$ . La diminution de l'absorption de la région carbonyle pourrait être attribuée au déplacement des hémicelluloses pendant le traitement alcalin [37]. L'intensité environ  $1375\text{cm}^{-1}$  est attribuée à la vibration de recourbement du groupe  $\text{CH}_3$ . Ces résultats montrent la similitude élevée de la structure chimique entre la fibre de palmier dattier et la fibre de coco [36]. Les résultats de FTIR n'indiquent pas un changement significatif de la structure chimique de la fibre traitées et non traité.

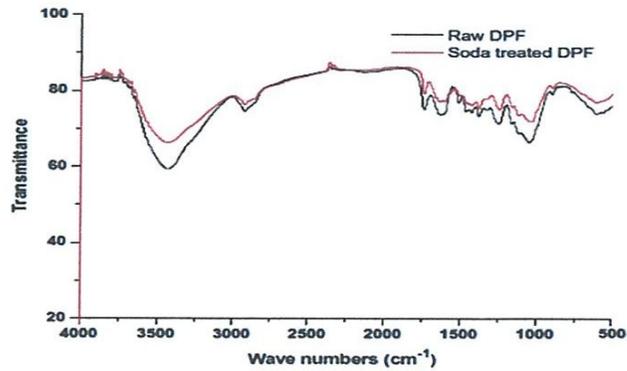


Fig.IV.5. (a) Spectres de FTIR de la fibre non traité et (b) fibres traité par la solution de soude (5%) de palmier dattier.

#### IV.5. Conclusions

L'alcalin et le traitement d'acétylation se sont appliqués aux DPF et les fibres qui montrent les différentes propriétés comparant à différents types de traitements et méthodes utiles. La morphologie de la surface montre une amélioration avec le traitement de soude. Les fibres traitées par la soude ont montré la croissance significative dans la résistance à la traction et l'amélioration considérable dans la morphologie de surface. Les résultats montrent que le traitement pour 1% de NaOH pendant 1 h avec une température de 100 °C est le traitement optimum qui donne la résistance à la traction maximale et la meilleure morphologie de surface de la DPF. Le Traitement par l'acide chlorhydrique est rejeté comme traitement des fibres en raison de son impact négatif sur la résistance à la traction et la morphologie de surface de la DPF. L'analyse thermique de la DPF montre une résistance jusqu'à 260°C et les fibres traitées avec la soude présentent une meilleure résistance thermique par rapport aux fibres non traitées. L'analyse FTIR des fibres présentes une similitude des spectres DPF avec d'autres types de fibres végétales et aucune altération significative entre la fibre non traités et traitées.

## I. Conclusion

L'utilisation des fibres végétales (de palmier dattier, sisal, Agave, etc.) comme renfort dans les matériaux composite représente une voie prometteuse car elle permet l'amélioration de l'ensemble des propriétés du matériau. L'accroissement des propriétés mécaniques provient des propriétés élevées de la fibre (module, contrainte à la rupture), mais de nombreux autres paramètres comme la taille des fibres, la modification de la surface par traitement chimique (NaOH, etc.), la teneur en fibres, les « additifs » (agent de couplage, comptabilisant, argile, etc.) influencent également les propriétés mécaniques ainsi que d'autres caractéristiques du composite (stabilité thermique, cristallinité, absorption d'eau, etc.). La réalisation d'un matériau composite avec les meilleures propriétés possibles passe donc par le contrôle de tous ces paramètres.

Dans ce premier chapitre quelque référence bibliographique présenté dans la littérature en été étudié en focalisons sur : le résumé, la description des techniques utilisées et en fin les principaux résultats ont été éclair

## *Chapitre II*

# *Technique expérimentale*

## *Chapitre II*

### *Technique expérimentale*

#### **Introduction**

Dans ce chapitre les différentes techniques expérimentales utilisées pour l'analyse de nos matériaux d'étude seront présentées comme suit :

- Morphologie de la plante de jute ;
- Découpe des échantillons de traction du tissu de jute à partir des rouleaux;
- Fabrication des plaques bio-composites jute/polyester;
- Découpe des échantillons à partir des plaques bio-composites jute/polyester fabriqués;
- Description des conditions d'essais mécaniques statiques (traction, flexion 3-points).

#### **II.1.Plante du jute**

##### **II.1.1. Morphologie de la plante de jute**

Cette fibre naturelle d'aspect soyeux est surnommée « fibre d'or » en raison de ses reflets (Figure II.1). Il s'agit d'une culture annuelle qui prend environ 120 jours pour arriver à maturité : avril/mi-juillet et/août [38].

Le jute prospère dans les terres tropicales situées à faible altitude et ayant un taux d'humidité compris entre 60 et 90 %. C'est une culture pluviale peu gourmande en engrais et pesticides. Son rendement est d'environ deux tonnes de fibre sèche par hectare. Le jute est l'une des fibres naturelles les moins chères. Il vient en deuxième position derrière le coton sur le plan des volumes produits comme de la diversité des usages [38].



Figure II.1. La plante de Jute [38].

### II.1.2. Fibre de jute

La fibre de jute est longue, douce et brillante, sa longueur vari de 1 à 4 mètres et son diamètre de 17 à 20 microns. Elle est essentiellement composée de cellulose végétale et de lignine, qui sont respectivement les principaux composants de la fibre végétale et de la fibre de bois. Les méthodes de rouissage utilisées pour séparer l'écorce filamenteuse d'avec la tige peuvent être biologiques ou chimiques, mais les premières sont plus répandues compte tenu du coût des produits chimiques. Le rouissage biologique englobe plusieurs techniques consistant à lier les tiges en faisceaux avant de les faire tremper afin de séparer plus facilement les fibres de la tige. On gratte ensuite la matière non fibreuse, ce qui permet enfin d'arracher les fibres.

En plus la fibre de jute est totalement biodégradable et recyclable, la fibre de jute est respectueuse de l'environnement. Un hectare de jute consomme environ 15 tonnes de dioxyde de carbone et relâche 11 tonnes d'oxygène. La rotation des cultures permet par ailleurs d'améliorer la fertilité des sols au profit de la récolte suivante. De surcroît, le jute ne produit pas de gaz toxique lorsqu'il est brûlé. Le jute est une fibre polyvalente. Avec la Révolution industrielle, il a largement devancé le lin et le chanvre dans la fabrication des sacs, lesquels représentent aujourd'hui encore l'essentiel des produits issus de cette fibre. Le jute a comme caractéristique intéressante de pouvoir être utilisé indépendamment aussi bien qu'avec diverses fibres et matières. S'il est de plus en plus souvent remplacé par des matières

synthétiques, certains fabricants tirent parti de sa biodégradabilité pour des usages où ces dernières seraient inadaptées. On le retrouve par exemple dans des toiles pour mottes, destinées à la plantation de jeunes arbres, ou encore dans les géotextiles, pour lutter contre l'érosion et maintenir les sols. Ces produits se désagrègent et il donc est inutile de les retirer du sol [38].



**Fig.II.2.** La fibre de jute [39]

### **II.1.3. Application de la fibre de jute en Textiles**

Les principaux produits à base de jute sont les fils et ficelles, les sacs et autres toiles et les dos de tapis. La fibre de jute est également utilisée dans des textiles mixtes. Elle présente une forte résistance à la traction, une faible extensibilité et permet d'améliorer la «respirabilité». Elle est tissée pour fabriquer des rideaux, des revêtements de chaises, des tapis et des carpettes, et se trouve souvent mélangée avec d'autres fibres synthétiques ou naturelles. De surcroît, les fils les plus fins peuvent être séparés pour imiter la soie. Il est également possible de mélanger le jute avec la laine, en le traitant auparavant avec de la soude caustique afin d'en améliorer l'ondulation, la douceur, la souplesse et l'apparence générale [39].

### **II.1.4. Technique expérimentale**

#### **II.1.4.1. Caractérisation du renfort**

##### **II.1.4.1.1 Préparation des éprouvettes en tissu de jute**

Les rouleaux de tissus de jute sont fournis par de l'usine de fabrication des cordes en fibre naturelles de la Willaya de Bidjaia (Figure II.3). Les éprouvettes de traction en tissu de jute en

été découpé selon la norme AFNOR 57-101 avec les démenions de 250 x 25 x 1 mm (Figure II.4). Il est important aussi de signalé que le tissu de jute présente deux direction (chaîne Y et trame X) comme le montre la (Figure II.3a et 3c). Au moins 5 éprouvettes par type en été découpé dans le sens chaîne (Y) et trame (Y)

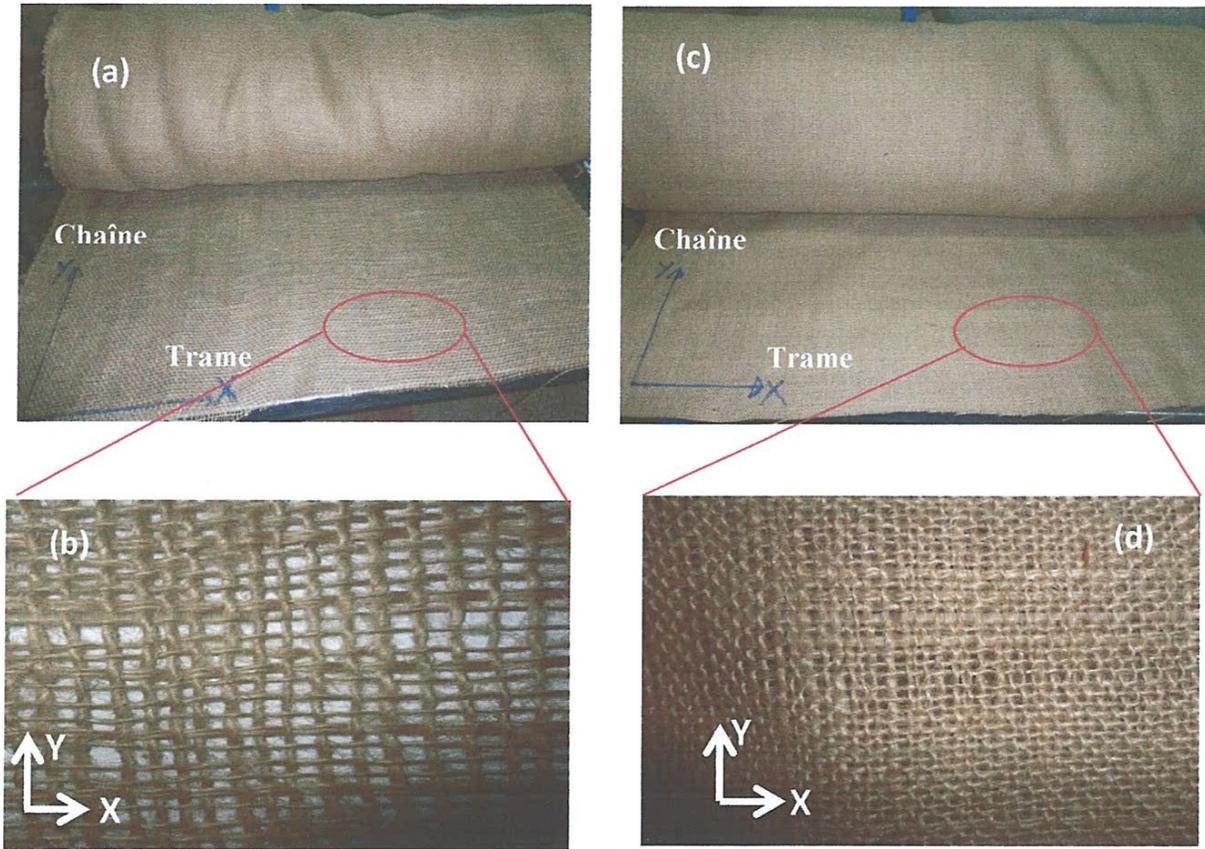


Figure II.3 : Rouleaux de tissu de jute (a) maillage Gros, (c) maillage fin et (b,d) zoom des zonez sélectionnés a et c.

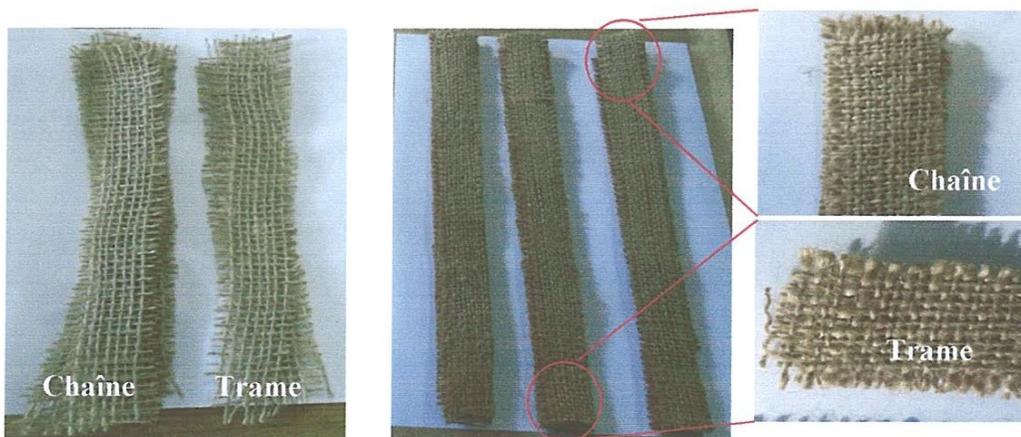


Figure II.4 : Eprouvette de traction des différent tissu de jute.

## II.2. Fabrication des plaques Bio-composites Jute/polyester

L'élaboration du stratifié jute/polyester est réalisée par la méthode de moulage au contact à basse pression, le tissu est préparé et découpé aux dimensions 320 x 320 mm et les bio-composites sont imprégnés à température ambiante (18 à 20°C) et la résine est catalysée et durcie dans des proportions comprises entre 1 et 1,5 % en masse [40]. L'ensemble plaque/renfort est mis à l'intérieur d'un moule en formica, une fois le moule créé d'un côté (épaisseurs de la plaque) prend la forme de la plaque [41]. L'ensemble reste sous le moule pendant 24 heures. Afin d'avoir une polymérisation totale de la résine. Ensuite les plaques stratifiées obtenue (Figure II.5) sont laissées à l'air libre pendant 7 jours. En fin les plaque en été séché dans une étuve avec une température de 60°C d'une durée de 5 heures (Figure II.6).

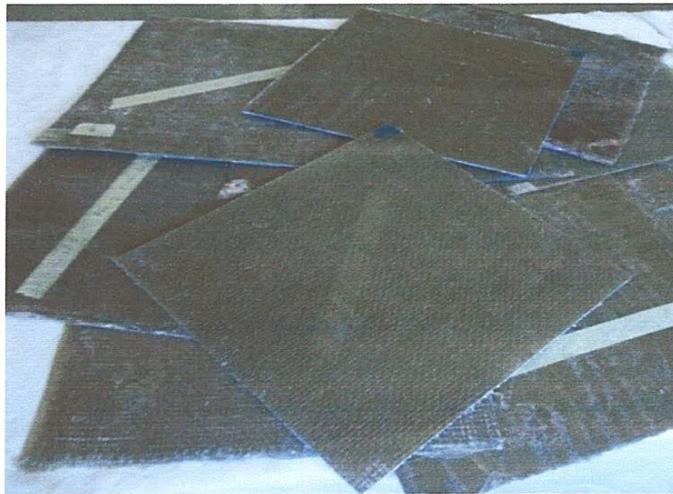


Figure II.5: Plaques stratifiées.



Figure II.6: L'étuve de séchage

### II.3. Découpe des échantillons à partir des plaques en bio-composite

Les échantillons sont découpé à partir des plaques bio-composite, sellons la norme AFNOR 57-101 (Figure II.7), à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamant. Après la découpe on a obtenu les éprouvettes avec les dimensions suivantes:

Pour les essais en traction :

- les plaque quatre plis :  $h = 5 \text{ mm}$ ,  $L = 250 \text{ mm}$ ,  $l = 25 \text{ mm}$  (Figure II.8).
- les plaque deux plis :  $h = 3 \text{ mm}$ ,  $L = 250 \text{ mm}$ ,  $l = 25 \text{ mm}$  (Figure II.9).

Pour les essais en flexion :

- Toutes les éprouvettes destinées pour les essais de flexion possèdent quatre plis :  
 $h = 5 \text{ mm}$ ;  $L = 130 \text{ mm}$ ,  $l = 13 \text{ mm}$  (Figure II.10).

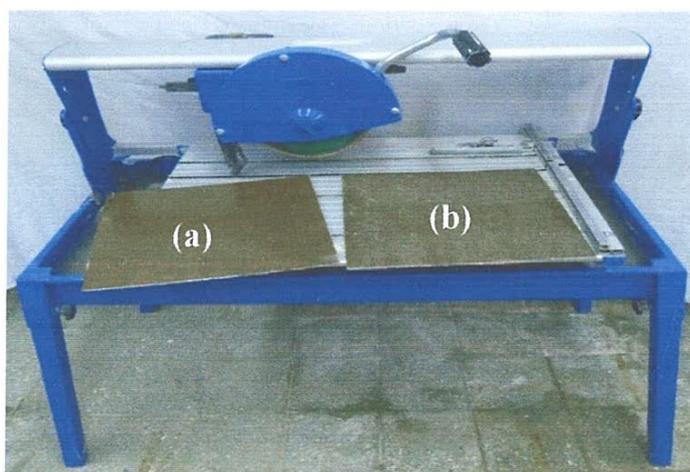


Figure II.7: Tronçonneuse a disque diamant du jute. (a) tissu gros (b) tissu fin.

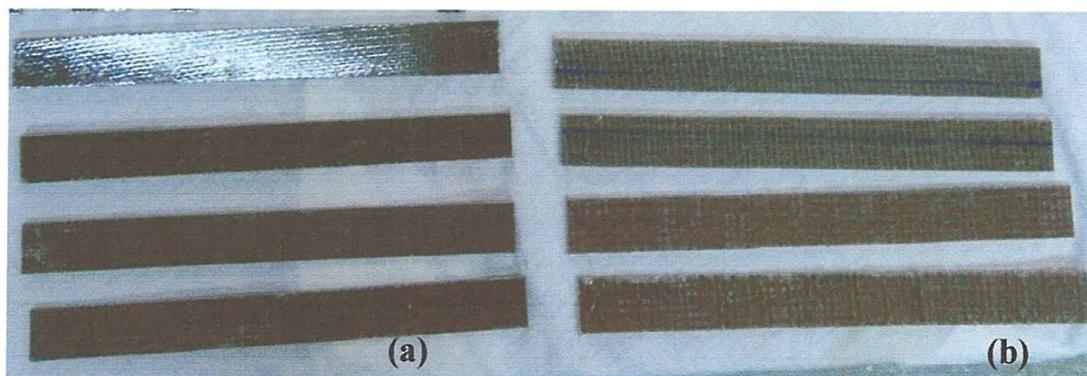


Figure II.8: Éprouvettes des essais en traction à partir an plaques quatre plis du jute. (a) tissu fin, (b) tissu gros.

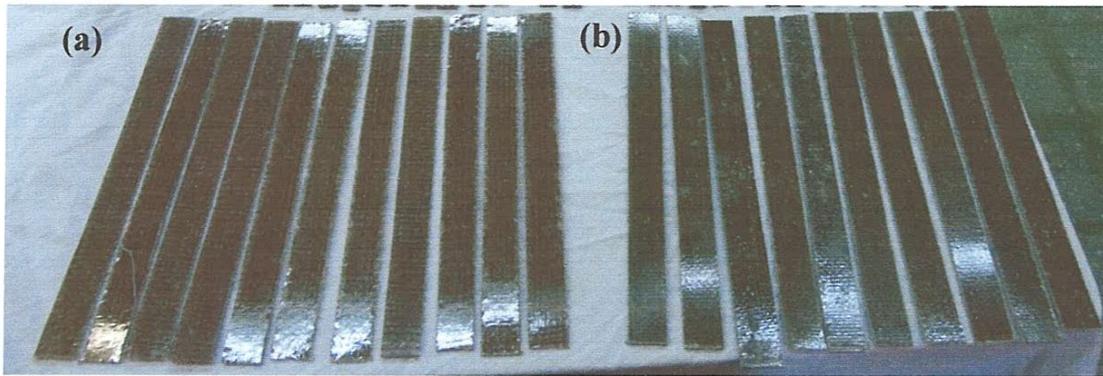


Figure II.9: Éprouvettes des essais de traction obtenue à partir an plaques à deux plis du jute. (a) tissu gros, (b) tissu fin.

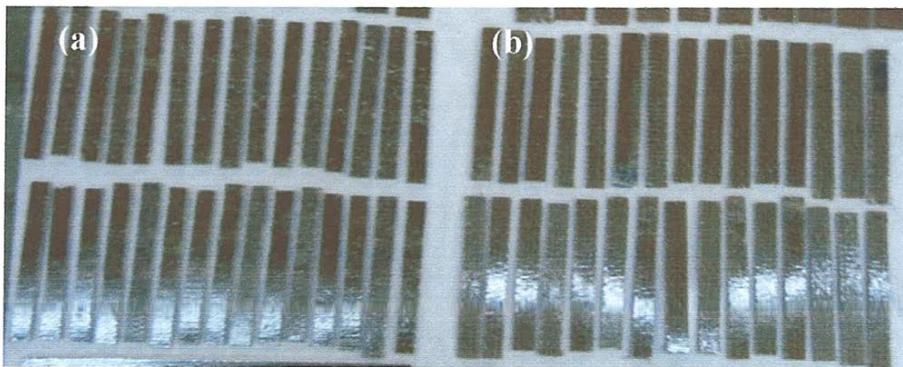


Figure II.10: Éprouvettes des essais de flexion obtenue à partir des plaques à quatre plis de tissu de jute. (a) tissu fin, (b) tissu gros.

## II.1.4. Conditions d'essais

### II.1.4.1. Machine d'essais

Les différents essais de traction et de flexion statique sont réalisés sur une machine d'essai universel de type **ZWICK ROELLE Z005** (Figure II.11). Cette machine est équipée d'une cellule de charge de 5 kN et d'un système d'entraînement de la traverse à l'aide d'un moteur électrique. La machine est pilotée par un logiciel Test expert V10.11 qui permet d'enregistrer les résultats sur un procès-verbal d'essais.

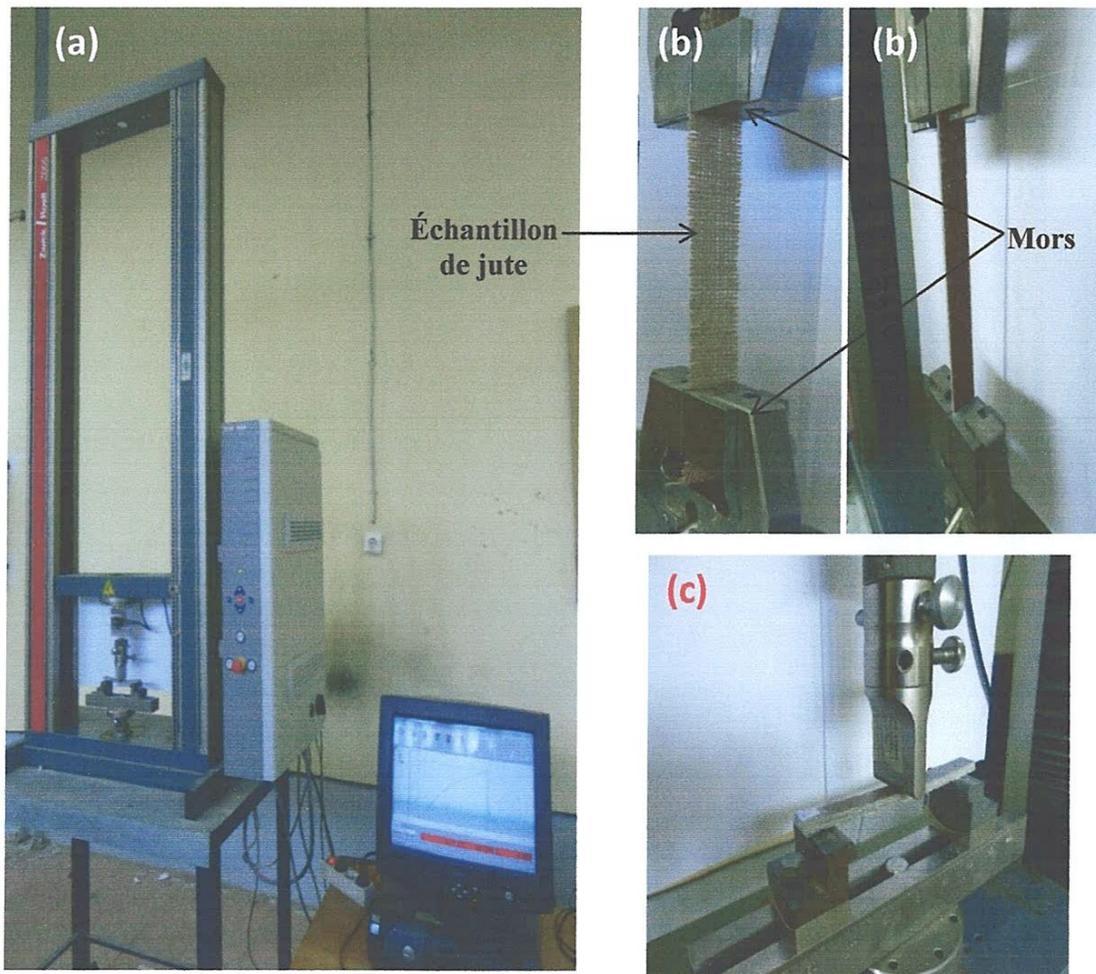


Figure II.11. (a) Machine d'essais (b) Dispositif de traction (c) Dispositif de flexion.

#### II.1.4.2. Essais statiques

- Les essais de traction statiques sont réalisés sur les tissus de jute avec une vitesse d'essai de 3 mm/min, selon la Norme **AFNOR 57-101**. Au moins cinq échantillons par type de tissu de jute pour longueur de mesure  $GL = 160$  mm (figure II.12);
- Les essais statiques de flexion trois points, sont réalisés à une vitesse d'essai de 2,5 mm/min, selon la Norme **ASTM D3822-01** sur des éprouvettes en stratifiés bio-composite ;
- La température d'essai est de 24°C ;
- Humidité environ 45%.

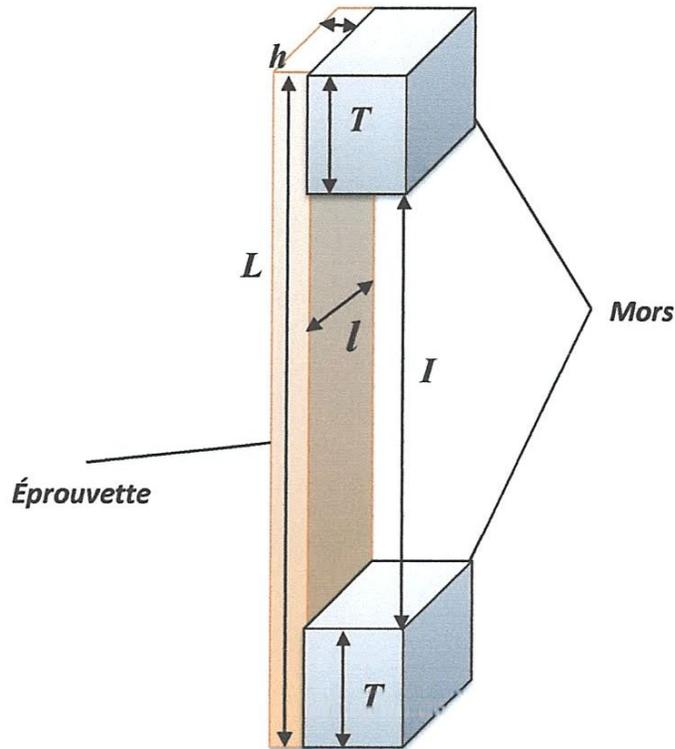


Figure II.12 : Éprouvette de traction avec étalons collés selon la norme AFNOR 57-101.

Tableau II.1. Dimensions des éprouvettes de traction selon la norme AFNOR 57-101.

Désignation	Dimension [mm]
$L$ : longueur totale minimale	250
$h$ : épaisseur des éprouvettes	2 à 10
$l$ : largeur de la partie calibrée	25 ou $50 \pm 0,5$
$I$ : distance entre les mors	$170 \pm 0,5$
$T$ : longueur minimale des talons	50

- ✓ Pour les essais de flexion trois points la norme **ASTM D3822-01** est utilisée pour dimensionner les éprouvettes qui sont de dimensions :  $h = 5$  mm,  $L = 130$  mm,  $l = 100$  mm, et  $b = 13$  mm

Où  $h$ ,  $L$ ,  $l$ ,  $b$  sont respectivement l'épaisseur, la longueur totale, entre appui et la largeur de l'éprouvette.

## **II.5. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons défini principalement :

- la plante de la fibre de jute et les principales applications de cette fibre ;
- préparation des plaques en fibre de jute dans le sens de la trame et de la chaîne ;
- Préparation des plaques bio-composites stratifiées jute, polyester ainsi que leur traitement dans une étuve à 70°C pendant 5 heures ;
- Découpe des échantillons en bio-composite selon les normes pour des essais de traction et de flexion statique.
- Finalement les conditions des essais de flexion et de traction sont définies.

## *Chapitre III*

# **Résultats et discussion**

## Chapitre III

# Résultats et discussion

### III.1. Introduction

Ce chapitre décrit les travaux expérimentaux effectués pour la détermination des caractéristiques mécaniques du tissu de jute et du bio-composite, élaborées au laboratoire de l'université de Guelma, testés en statique et il s'agit donc:

- d'essais de traction statique effectués sur le renfort en tissu de jute pour lesquels la contrainte, déformation et module d'Young sont déterminés.

- d'essais de traction et de flexion 3-points en statique effectués sur des composites stratifiés ayant différentes plis (2 plis et 4 plis) de tissu de jute, dont le but de déterminer leur propriétés mécaniques (module de Young, contrainte et déplacement à la rupture).

- L'observation des faciès de rupture a été effectuée après les essais statiques dont le but d'identifier les modes d'endommagement pour les stratifiés étudiés en traction et en flexion.

### III.2. Essais de traction

#### III.2.1. Caractérise de Tissu de jute

Quatre types de tissu de jutes sont utilisés dans cette étude :

**JFC** :-Tissu de jute fin selon le sens de chaine;

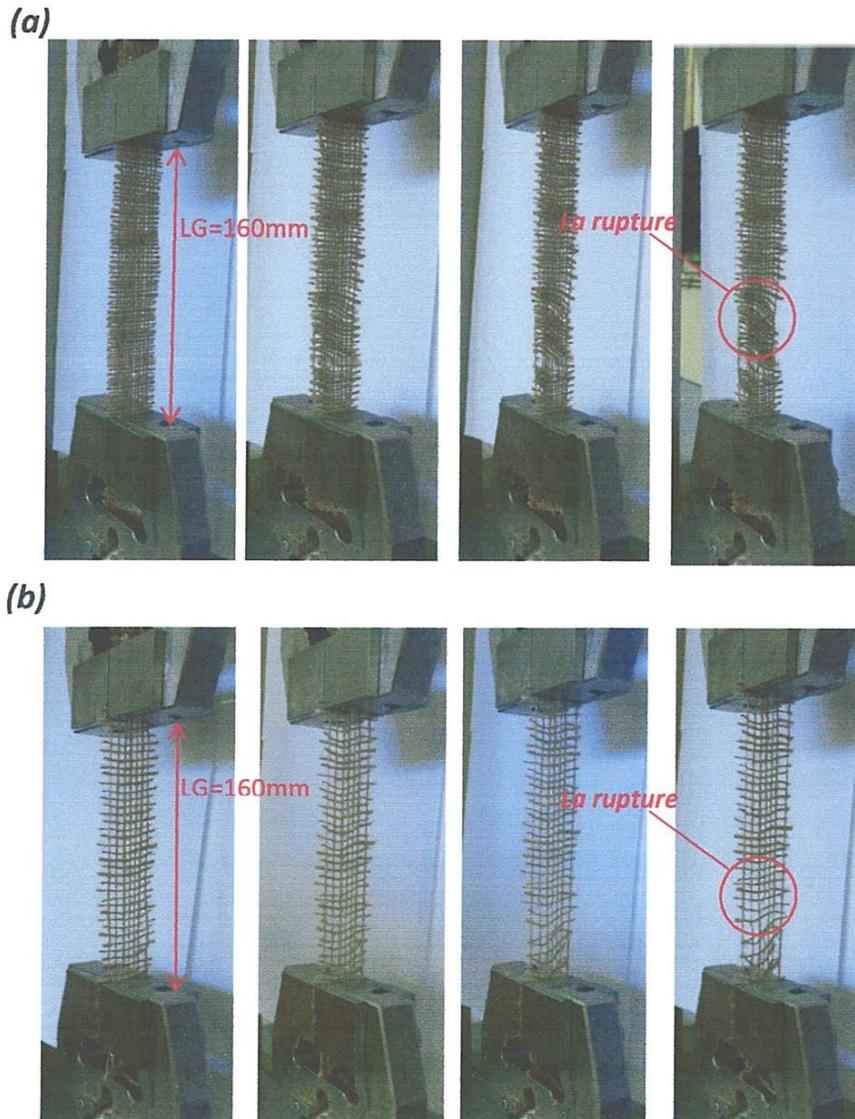
**JFT** : Tissu de jute fin selon le sens de trame;

**JGC** : Tissu de jute gros selon le sens de chaine;

**JGT** : Tissu de jute gros selon le sens de trame.

Pour l'identification des propriétés mécaniques (modules d'Young et contraintes de rupture dans les sens chaîne et trame) pour chaque type, des essais de traction sont réalisés suivant les normes **AFNOR 57-101**.

Les essais de traction, sont effectués sur des éprouvettes de dimensions 250 x 25 x 1 mm, ces dernières sont fixées grâce à des mors mécanique avec une pression de serrage due au ressort. Les essais de traction ont été effectués à une température ambiante de 20 °C avec une vitesse de 3 mm/min est la distance entre les mors (LG) est de 160 mm (figure III.1). Afin de calculer les déformations on mesure les déplacements de la traverse de la machine.



**Figure III.1.** Eprouvette d'essai (a) Montage du tissu de jute Fin (b) Montage du tissu de jute gros.

### III.2.1 Les résultats des essais de traction sur le tissu de jute

Les Figures III.2.a, 3a, 4a et 5a représentent le comportement charge/déplacement en traction des tissus de jutes fin et gros dans le sens de la chaîne et de la trame respectivement. Ce comportement est en trois phases : en premier lieu une phase non linéaire suivie par un comportement quasi linéaire jusqu'à atteindre la force maximale qui caractérise la rupture des éprouvettes et enfin une chute brutale de la force sous forme de zigzag est enregistré.

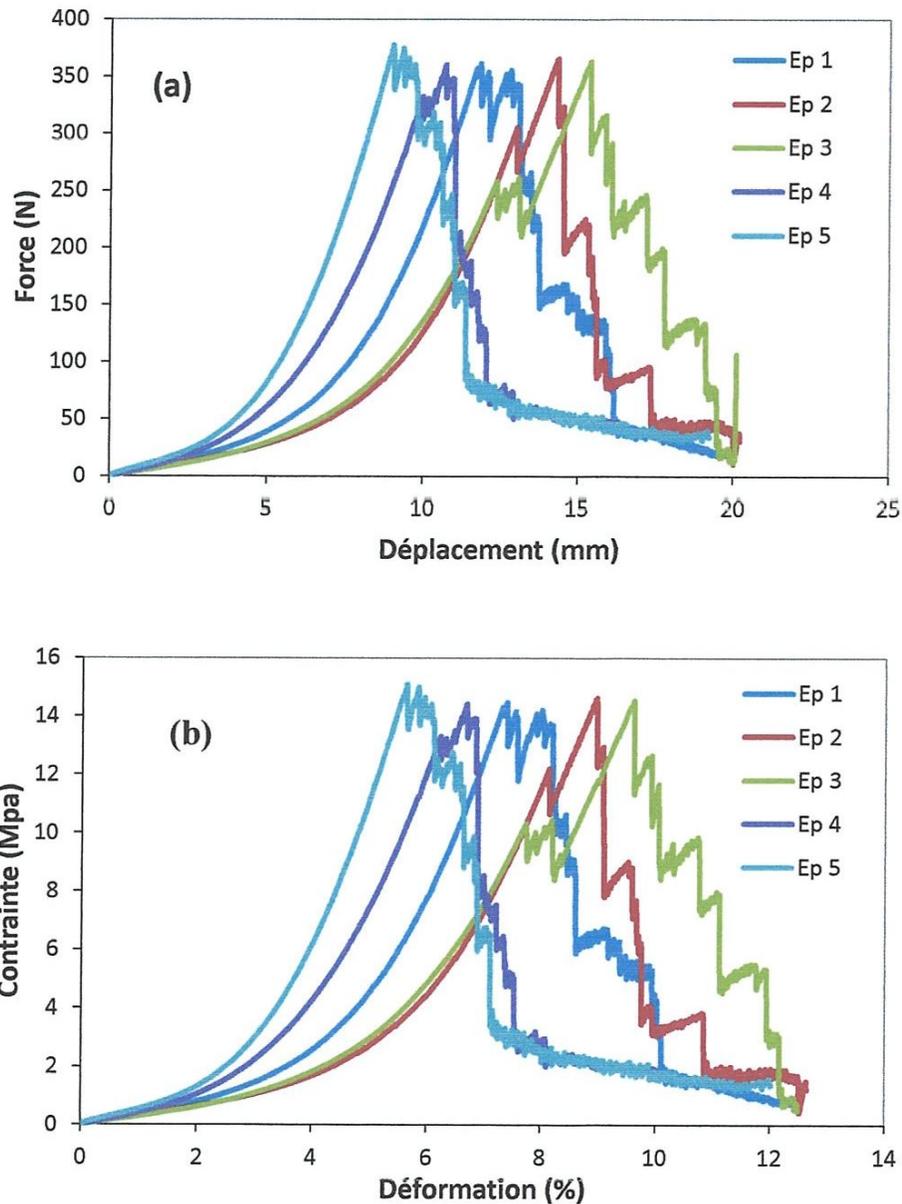


Figure III.2. Courbe de comportement de Charge/Déplacement et Contraint/Déformation de tissu JFC.

Les dispersions enregistrées de la force sont beaucoup plus faible que ceux du déplacement notamment pour les tissus en fibre de jute fin dans le sens de la chaîne (Figure III.2a).

Les comportements contrainte/déformation en traction des tissus de jutes fin et gros dans le sens de la chaîne et de la trame présenté dans les figures III.2.b, 3b, 4b et 5b sont similaires a ceux de la force/déplacement illustré dans les figures III.2.a, 3a, 4a et 5a.

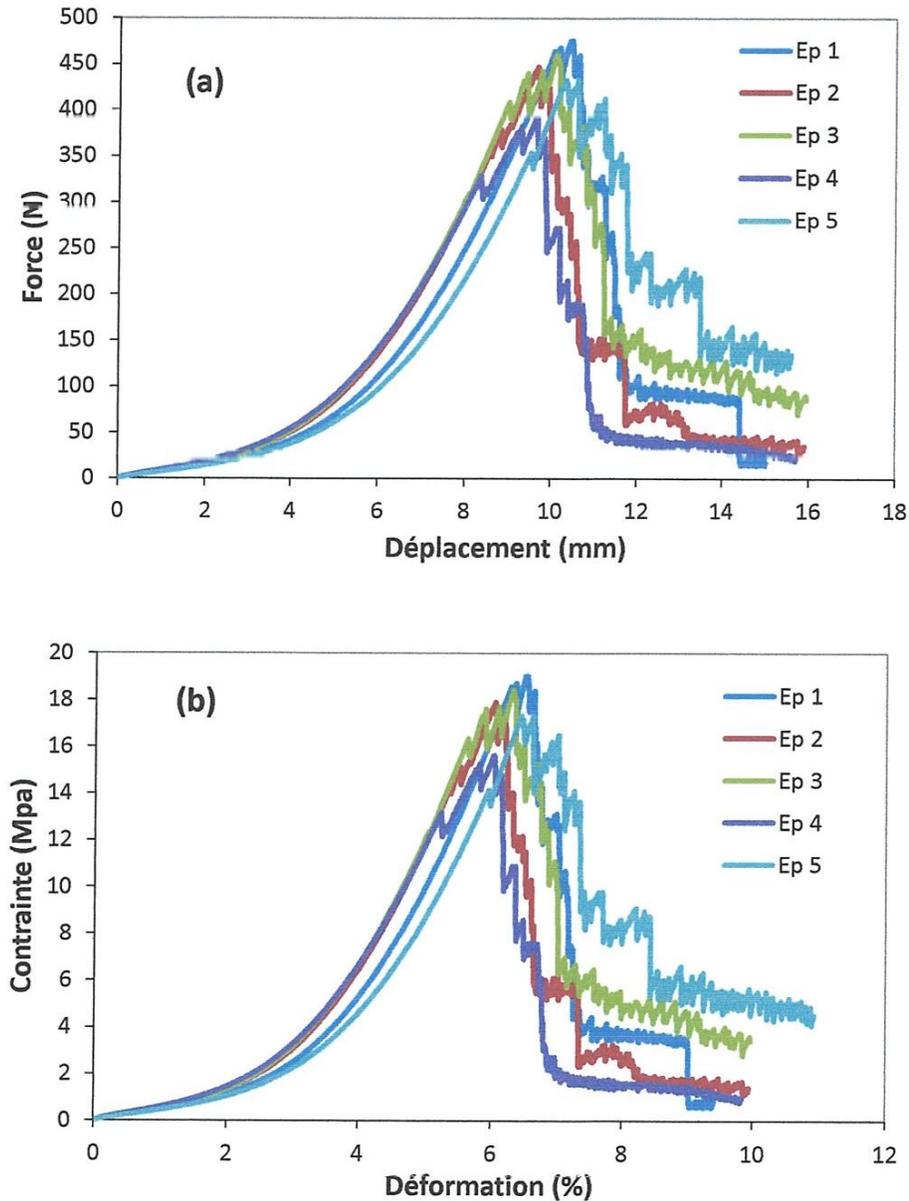
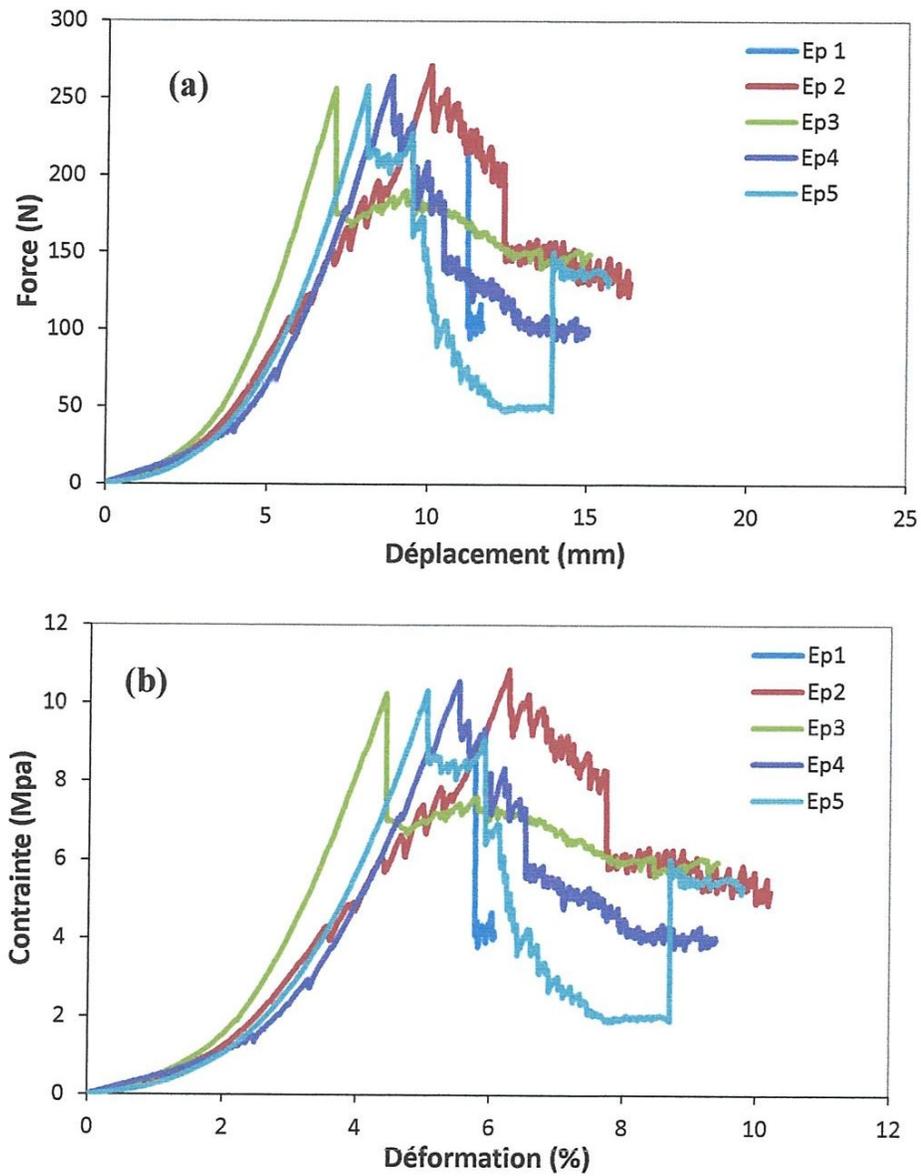
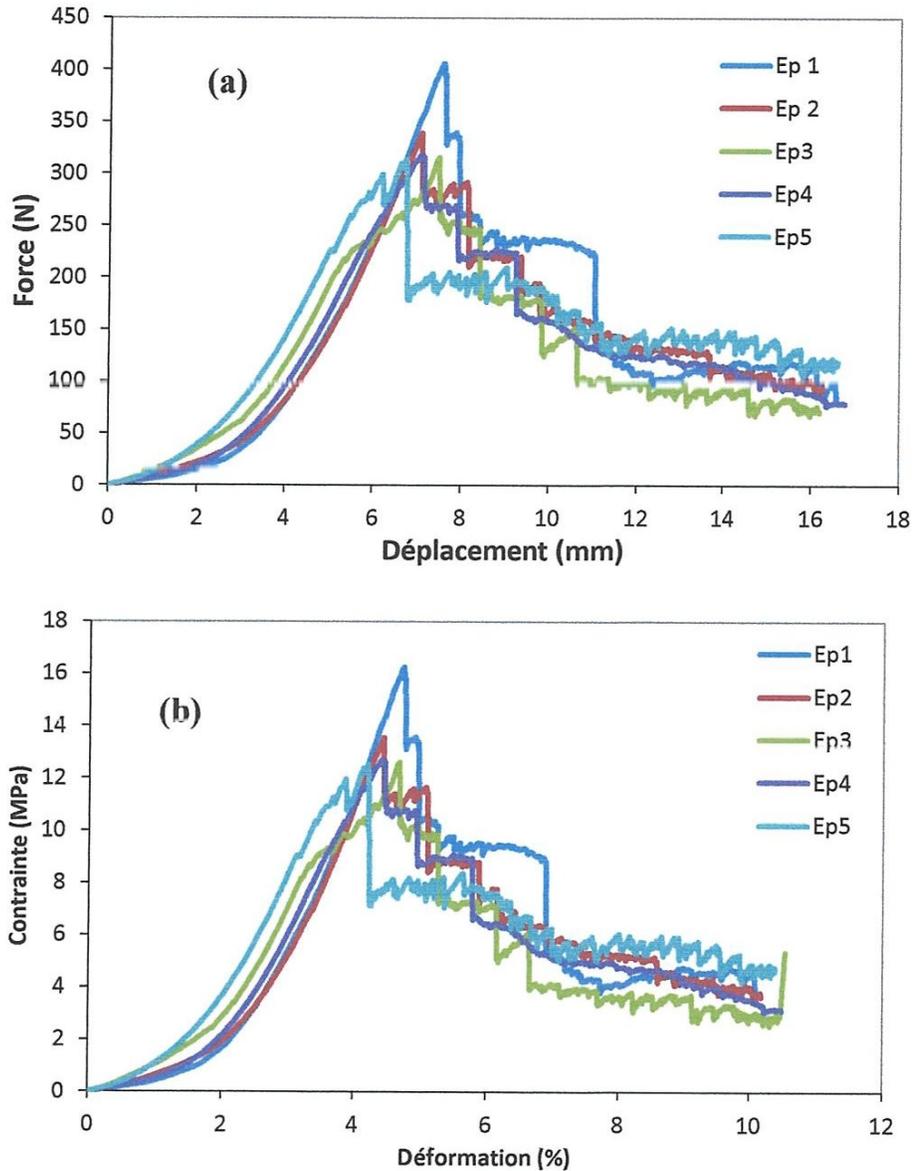


Figure III.3. Courbe de comportement de (a) Charge/Déplacement et (b) Contraint/Déformation de tissu JFT.



**Figure III.4.** Courbe de comportement de (a) Charge/Déplacement et (b) Contraint/Déformation de tissu de tissu JGC.



**Figure III.5.** Courbe de comportement de (a) Charge/Déplacement et (b) Contraincte/Déformation de tissu de tissu JGT.

Les résultats obtenus se caractérisent par des dispersions qui sont due d'une part à l'irrégularité des fibres des tissus de jutes et de la découpe des échantillons. De plus, les mèches d'un même tissu de jute ne possèdent pas les mêmes diamètres et longueur et la fibre de jute entre les files de tissu coupé à cause du tortillage c'est-à-dire que le nombre de fibre de jute dans les mèches n'est pas constant.

Les courbes contrainte/déformation (Figure III.2.b, 3.b, 4.b et 5.b) sont tracées pour s'affranchir du problème des dispersions des dimensions des éprouvettes en tissu de jute.

Les contraintes  $\sigma$  et les déformations  $\varepsilon$  sont calculées par les expressions :

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

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l} \quad (\text{III.2})$$

Où :  $F$ ,  $S$ ,  $l$  et  $l_0$  sont respectivement la force appliquée, la section, la longueur et la longueur initiale du tissu de jute.

#### III.2.1.1. Courbe type des différents tissus

La Figure III.6 représente les courbes type du comportement de la force/déplacement et contrainte/déformation en fonction des types de tissu de jute. Le module de Young a été calculé dans la partie élastique de la courbe contrainte/déformation, pour les différents types de tissu étudiés.

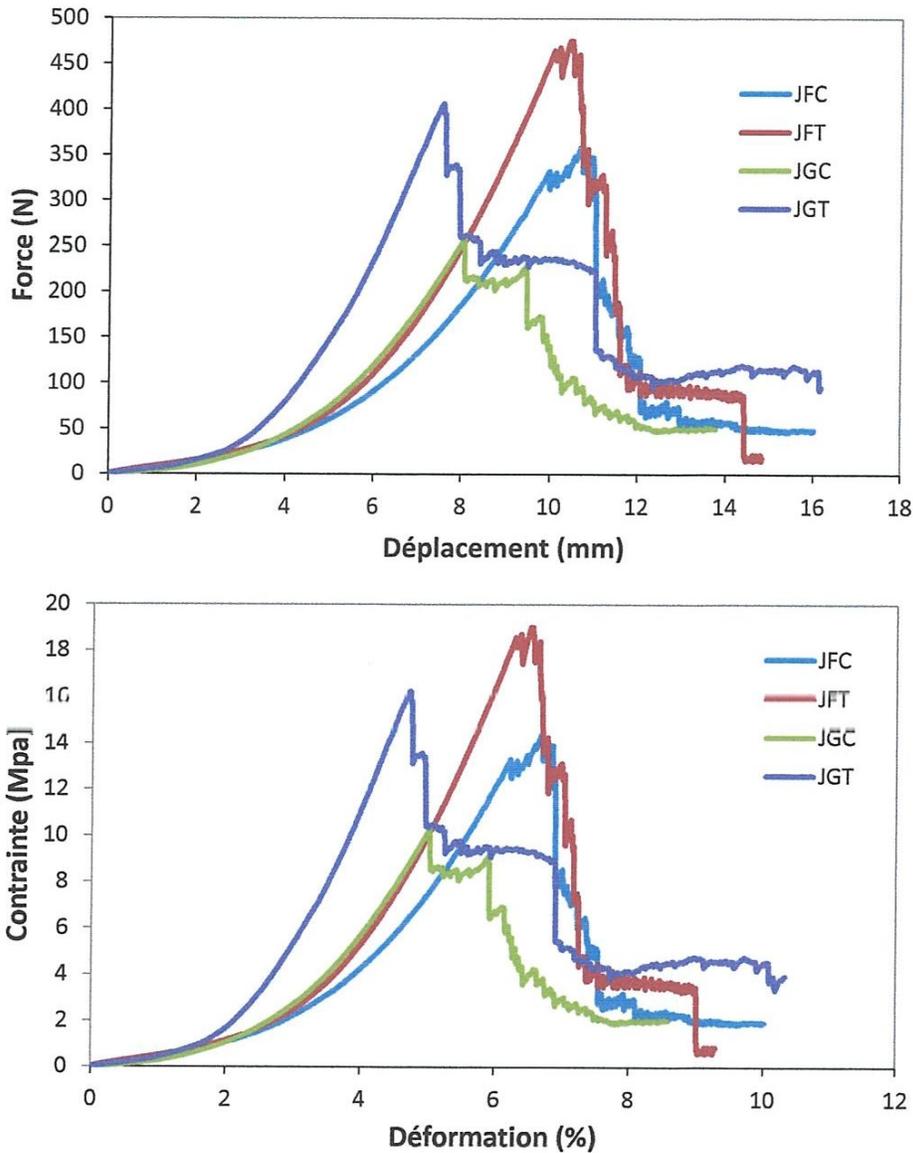
L'analyse des résultats obtenus montre que le meilleur comportement est obtenu pour le tissu fin dans le sens de la trame (*JFT*) (figure III.6.).

Ces résultats sont caractérisés par des dispersions dans la résistance à la traction qui est tout à fait caractéristique du tissu de jute. Ces dispersions peuvent être expliquées, par la distribution des défauts dans le tissu ou sur la surface de tissu ou encore différents types de tissu de jute. Les différences dans les résultats des propriétés mécaniques du tissu étudié (*tissu de jute Fin et gros pour deux sens*), ces différences des résultats des propriétés mécaniques pour les 4 types par le fait qu'elles ne sont pas le même comportement de fil de fil, ou la forme du tissu et le sens de découpe.

La comparaison des résultats expérimentaux obtenus avec ceux de la littérature est difficile du fait de la nature de la plante, de leurs maturités, des conditions climatiques du développement de cette plante et des conditions d'essais notamment la vitesse de sollicitation. Néanmoins un résumé des résultats des essais de traction sur les tissus de jute sont présentés dans le Tableau III.1. Pour ce qui concerne les caractéristiques de la plante, l'âge, type de tissage (mécanisme de tissage et découpe de tissu) aussi bien que la microstructure de la fibre de fil de jute.

La déformation à la rupture du tissu de jute varie avec le comportement de fil et type de tissu et sens de découpe. Ce comportement est lié à la taille moyenne et à la

distribution des imperfections dans le volume du tissu de jute par effet le comportement de fibre dans le fil de tissu de jute.



**Figure III.6.** Courbe type du comportement de Charge/Déplacement et Contraint/Déformation des tissus de jute.

Tableau III.1 représente les valeurs, moyenne avec leur déviations, obtenues des différents essais de traction des différents tissu de jute.

**Tableau III.1.** Caractéristiques mécaniques (déformation, contrainte et module de Young) des différents tissus de jute obtenu expérimentalement par des essais de traction.

	Caractéristiques mécaniques
--	-----------------------------

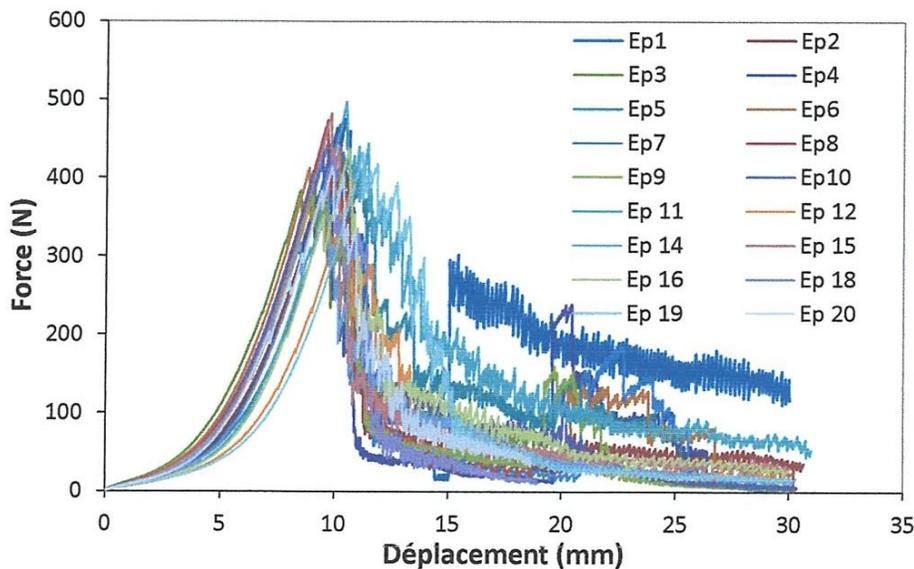
Ep	$\epsilon_{rup}$ [%]	$\sigma_{rup}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
JFC	8,58±1,15	14,62±0,27	36,38±9,70
JFT	6,21±0,37	17,67±1,29	48,10±5,25
JGC	5,71±3,29	10,45±0,94	43,86±6,71
JGT	5,71±3,29	13,54±1,56	69,35±18,49

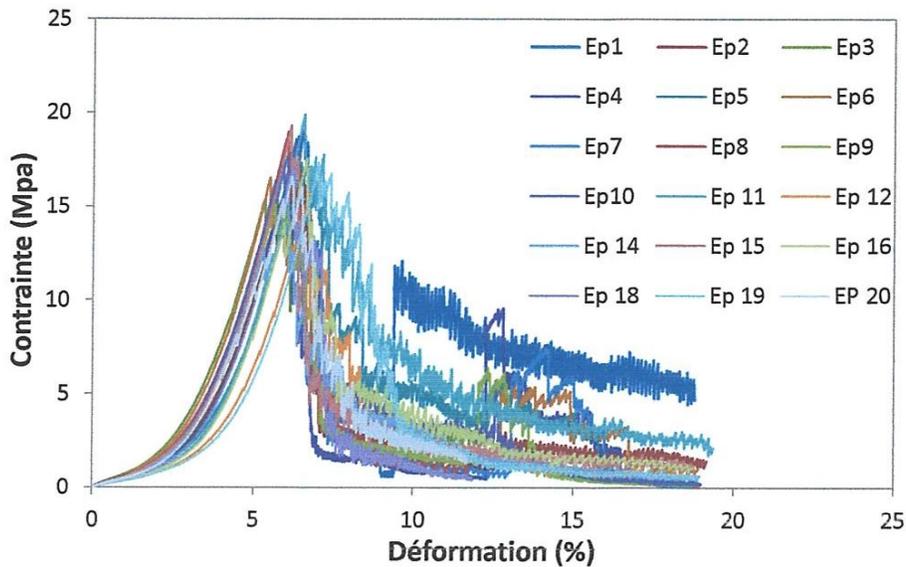
Les résultats obtenus (Tableau III.1) montre que la contrainte à la rupture (17,67 MPa) est la plus élevée pour le tissu de jute fin selon le sens trame par rapport au autres type de tissu, par contre, les déformations à la rupture (8,58 MPa) les plus importantes sont obtenues pour le tissu fin dans le sens de la chaîne. Le module de Young maximale (69,35 MPa) est obtenu pour le tissu gros dans le sens de la trame.

Les dispersions dans le module, pour donner de mesure sont probablement dues à la variabilité dans la microstructure de la fibre de jute et des dommages possibles qui se sont produits pendant le procédé de découpe et type de tissu. Une région non linéaire est observée, après la partie initiale (entre 0,5 à 1 % de déformation) de la courbe contrainte/déformation, pour certains tissus testés.

### III.2.1.2 Etude statistique de Weibull

La distribution de Weibull à deux paramètres a été appliquée pour les propriétés mécaniques à savoir la contrainte à la rupture et le module de Young qui ont montré une grande dispersion dans les résultats, ont été contrai de faire plus de 20 testes afin d'avoir une estimation moyenne des propriétés (Figure III.7).





**Figure III.7.** Courbe de comportement de charge /déplacement et contrainte/déformation des 20 échantillons testés de tissu de jute Fin sens trame

Donc l'équation de Weibull est comme suit [40]:

$$P(\xi) = \exp \left[ - \left( \frac{\xi}{\xi_0} \right)^m \right]$$

Où  $P(\xi)$  est la probabilité de survie en fonction du paramètre  $\xi$ ,  $m$  est un paramètre de forme sans dimensions relier directement aux dispersions des données expérimentales, et  $\xi_0$  est un paramètre locale qui représente une valeur moyenne de  $\xi$  [41].

La valeur  $P$  est évaluée par un estimateur métrique (valeur d'un rang moyen) [43, 44, 45]:

$$P_i = \frac{i-0.5}{n}$$

Où  $i$  est le rand du  $i^{\text{ème}}$  point de donnée et  $n$  le nombre de points. Les paramètres  $m$  et  $\xi_0$  sont obtenues à partir d'un traçage d'une ligne droite de Weibull  $\ln [-\ln (1/1-P)]$  en fonction de  $\ln(\xi)$ , par conséquent, un modèle linéaire est obtenu.

Les (Fig. 8 et 9) montrent la distribution de Weibull pour la contrainte à la rupture et le module de Young des tissu de jute JFT. Il faut voir qu'une distribution de Weibull à deux paramètres fournit une approximation raisonnable des données expérimentales pour les deux propriétés mécaniques. La forme de Weibull et les paramètres locales (qui sont des valeurs caractéristiques de la distribution) pour chaque propriété. Le module de Weibull de la contrainte à la rupture  $m_\sigma$  et du module de Young  $m_E$  sont respectivement 9,90 et 4,73

pour le tissu de jute fin testé dans le sens de la trame pour une longueur de mesure de 160 mm.

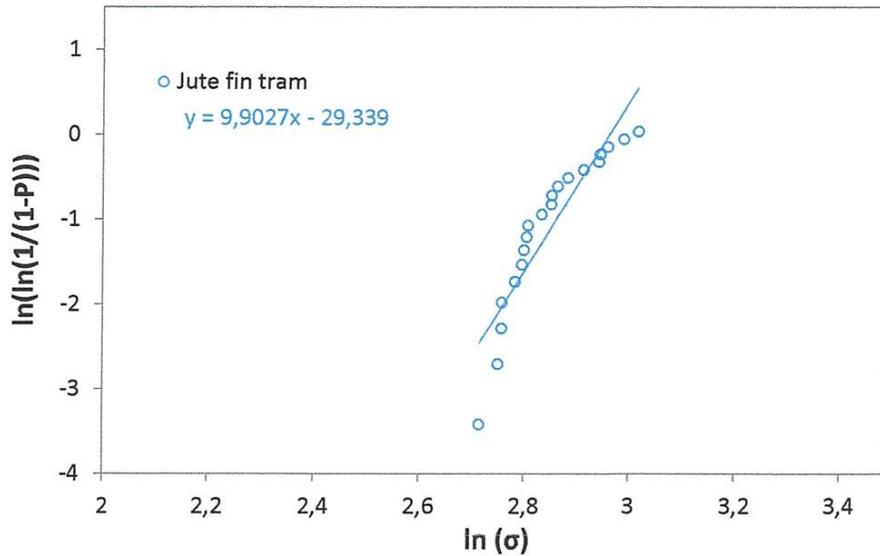


Figure III.8. Distribution de Weibull pour la contrainte de la JFT.

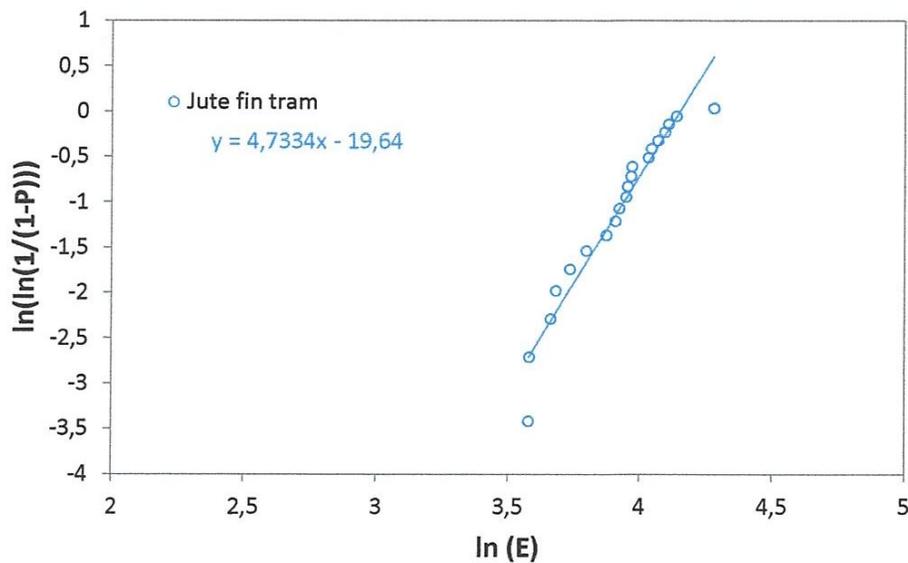


Figure III.9. Distribution de Weibull pour le module de Young de JFT.

### III.2. Essai de traction sur les bio-composites stratifiés (tissu de jute/polyester)

Les essais de traction ont été effectués jusqu'à la rupture des éprouvettes sur huit types de composites stratifiés à tissus de jute (figure III.10).

Huit types du composite de jutes utilisés dans cette étude désigné comme suit:

**C4PFC**: Composite 4 plis Fin selon le sens Chaîne;

**C4PFT**: Composite 4 plis Fin selon le sens Trame;  
**C4PGC**: Composite 4 plis Gros selon le sens Chaîne;  
**C4PGT**: Composite 4 plis Gros selon le sens Trame;  
**C2PFC**: Composite 2 plis Fin selon le sens Chaîne;  
**C2PFT**: Composite 2 plis Fin selon le sens Trame;  
**C2PGC**: Composite 2 plis Gros selon le sens Chaîne;  
**C2PGT**: Composite 2 plis Gros selon le sens Trame.

Les essais de traction, sont effectués sur des éprouvettes de dimensions 250 x 25 x 5 mm et 250 x 25 x 3 mm pour 4 plis et 2 plis respectivement, ces dernières sont fixées grâce à des mors mécanique avec une pression de serrage due au ressort. Les essais de traction ont été effectués à une température ambiante de 20 °C avec une vitesse de 3 mm/min est la distance entre les mors (LG) est de 160 mm (figure III.10). Afin de calculer les déformations on mesure les déplacements de la traverse de la machine.

### III.2.1. Mode d'endommagement des éprouvettes sollicitées en traction monotone

La Figure III.10 représente la rupture des éprouvettes testée en traction monotone pour les huit types de composites tissus de jute/polyester. Le mode d'endommagement des stratifiés dépend de l'orientation du tissu (Fig.III.10).

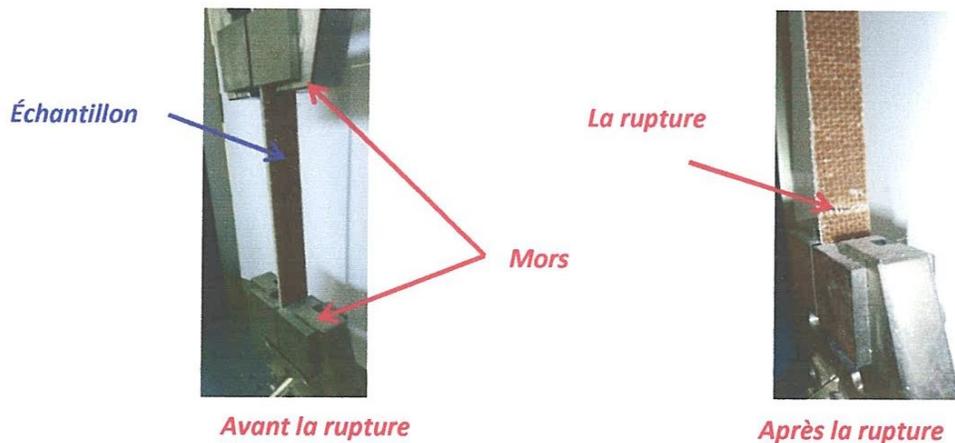
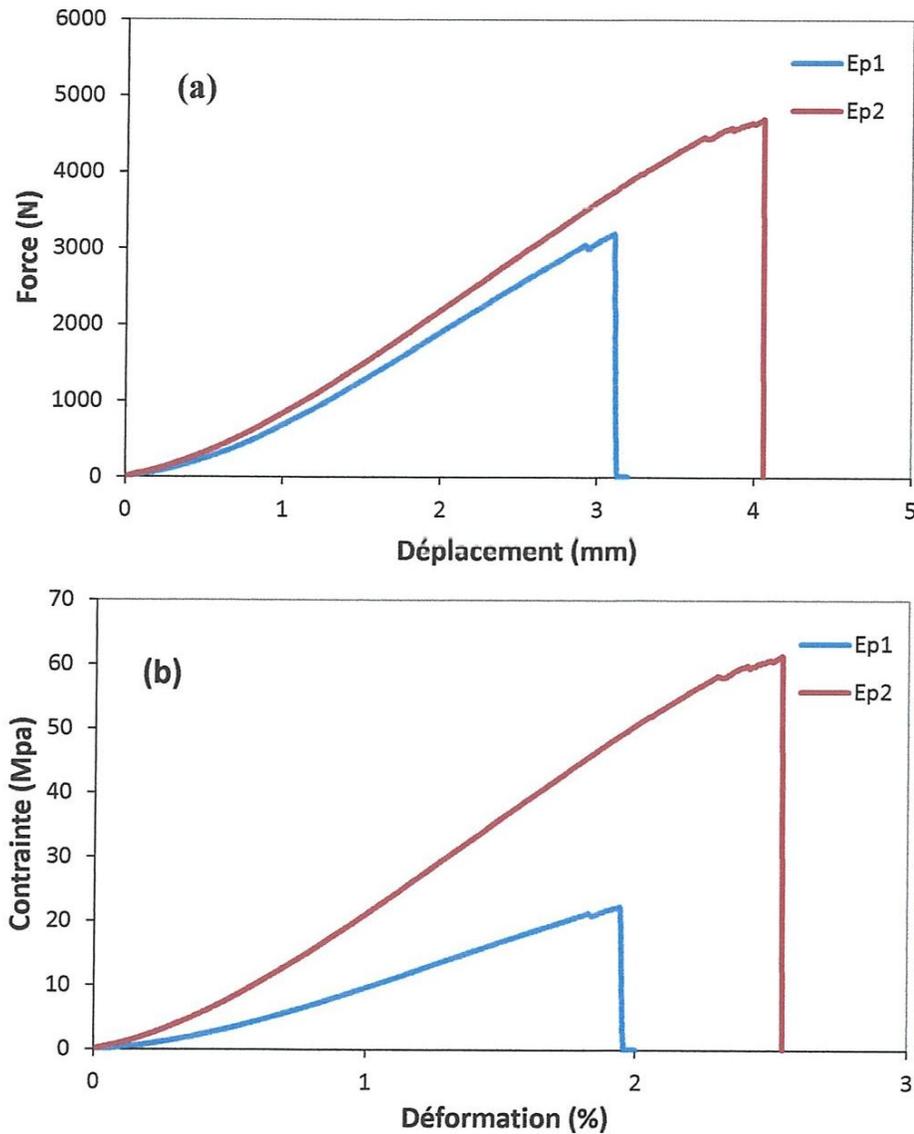


Figure III.10. Essai de traction des éprouvette en stratifiés jute/polyester.

### III.2.2. Les résultats des essais de traction sur le Composite stratifié jute/polyester

Les Figures III.12a., 13a, 14a, 15a, 16a, 17a, 18a et 19a représentent le comportement charge/déplacement en traction des composite de jutes fin et gros dans le

sens de la chaîne et de la trame et 2 plis et 4 plis respectivement. Ce comportement est en deux phases : en premier lieu une phase quasi linéaire suivie par un comportement linéaire jusqu'à la rupture brutal des éprouvettes. Le module longitudinal a été calculé pour des déformations comprises entre 0,5 à 1 % selon la norme AFNOR et les courbes contrainte/déformation sont présentés dans les Figures III.12b., 13b, 14b, 15b, 16b, 17b, 18b et 19b.



**Figure III.12.** Comportement (a) Charge/Déplacement et (b) Contraint/Déformation du composite C4PFC.

Il est a noté que les résultats obtenu se caractérisé par des dispersions notamment pour le composite C4PFC (Figure III.12).

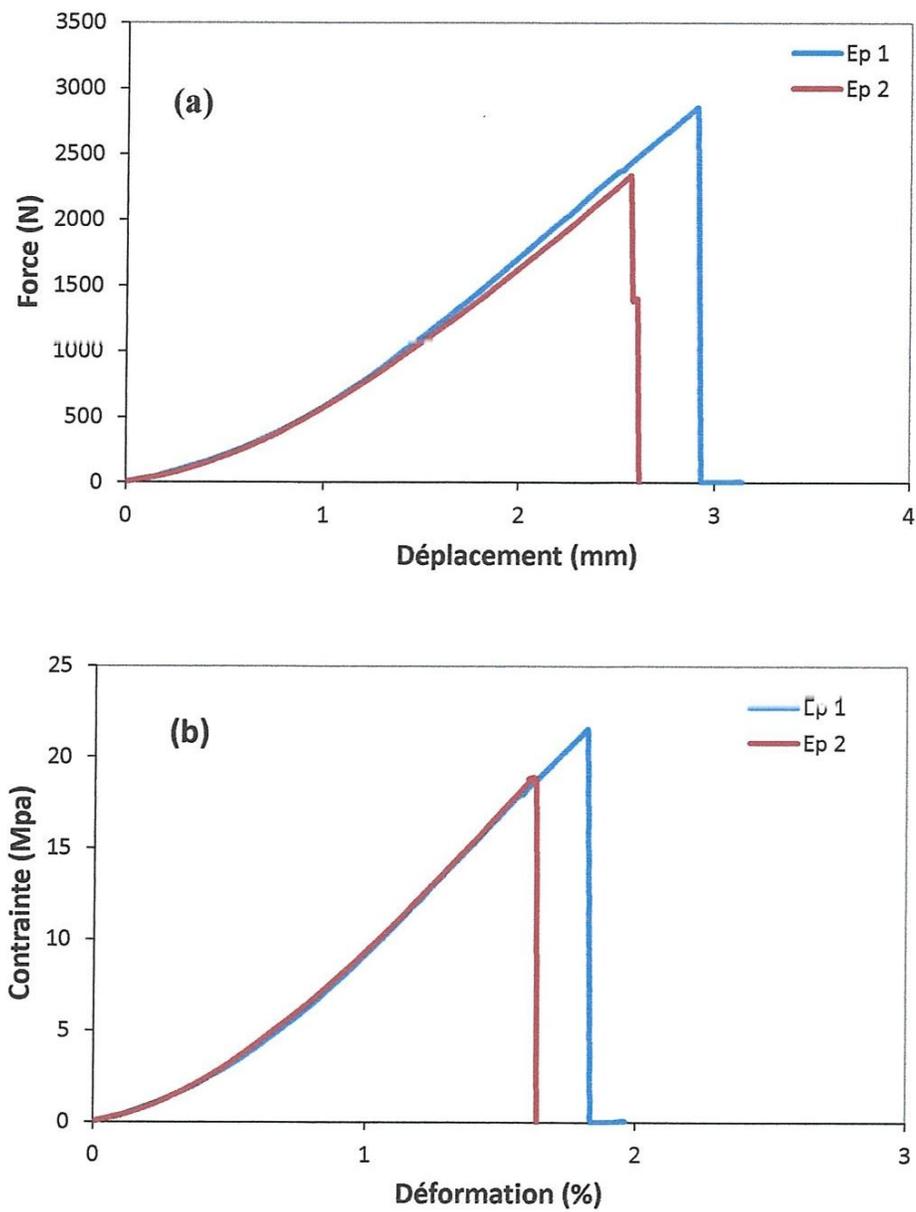


Figure III.13. Comportement (a) Charge/Déplacement et (b) Contraint/Déformation du composite C4PGC.

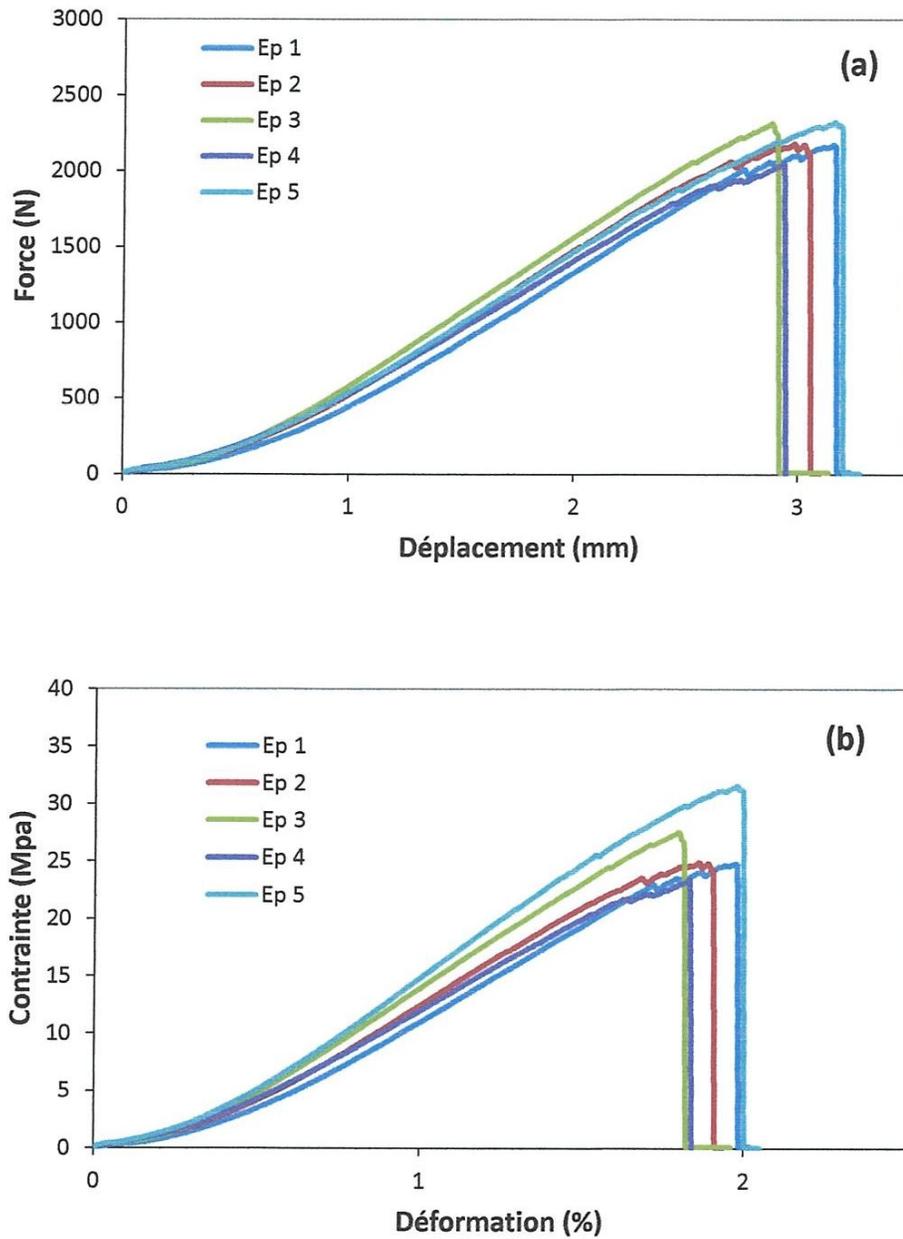


Figure III.14. Comportement (a) Charge/Déplacement et (b) Contraint/Déformation du composite C2PFC.

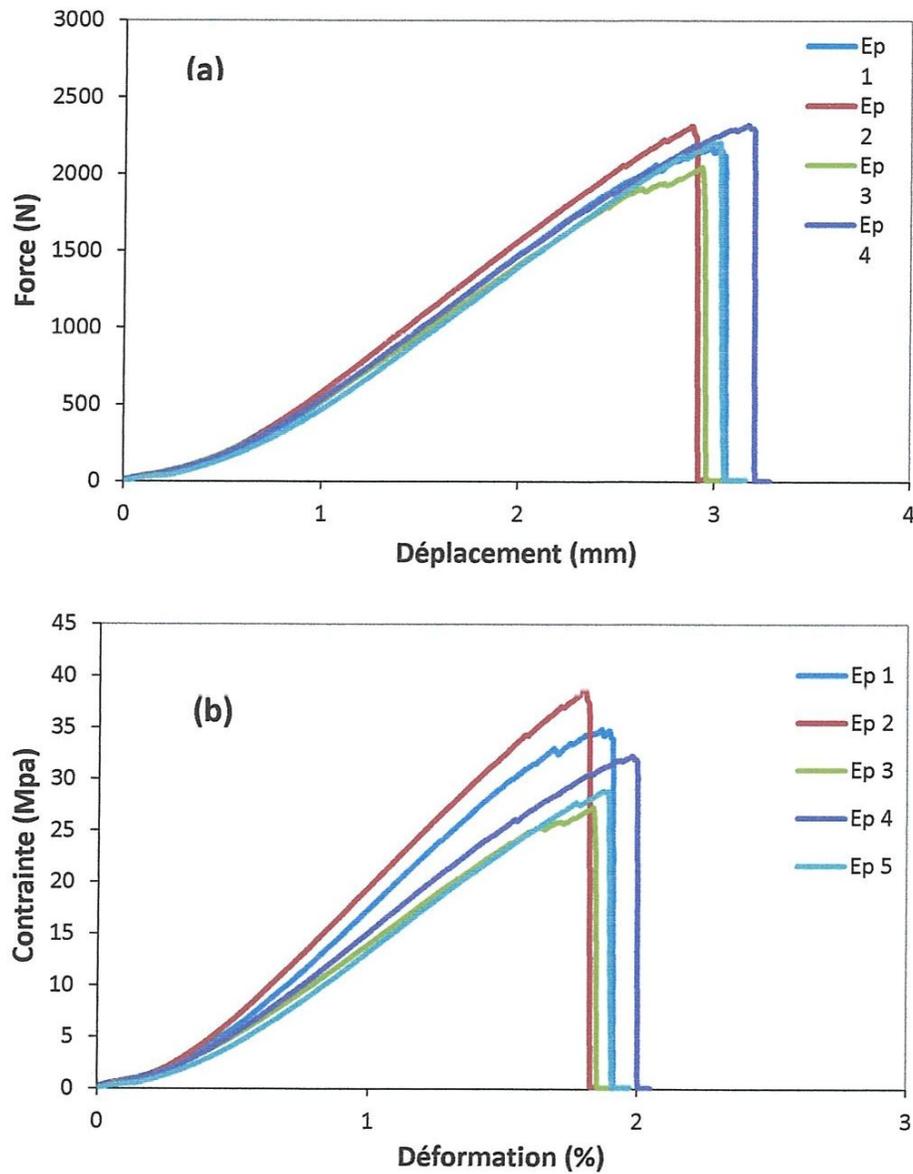


Figure III.15. Comportement (a) Charge/Déplacement et (b) Contraint/Déformation du composite C2PGC.

Les dispersions enregistrées de la force sont beaucoup plus faible que ceux du déplacement notamment pour les deux composites C2PFC et C2PGC (Figure III.14a et 15a).

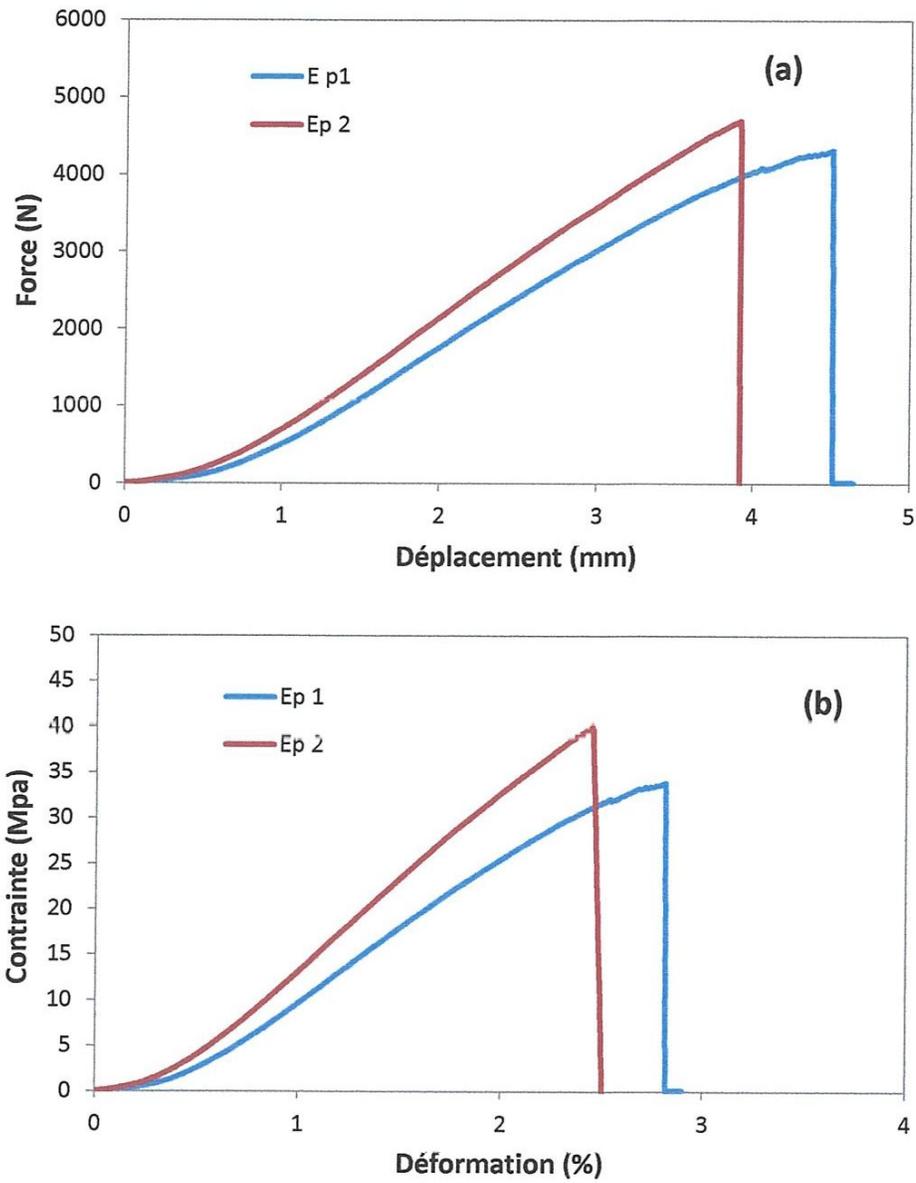


Figure III.16. Comportement (a) Charge/Déplacement et (b) Contraint/Déformation du composite C4PFT.

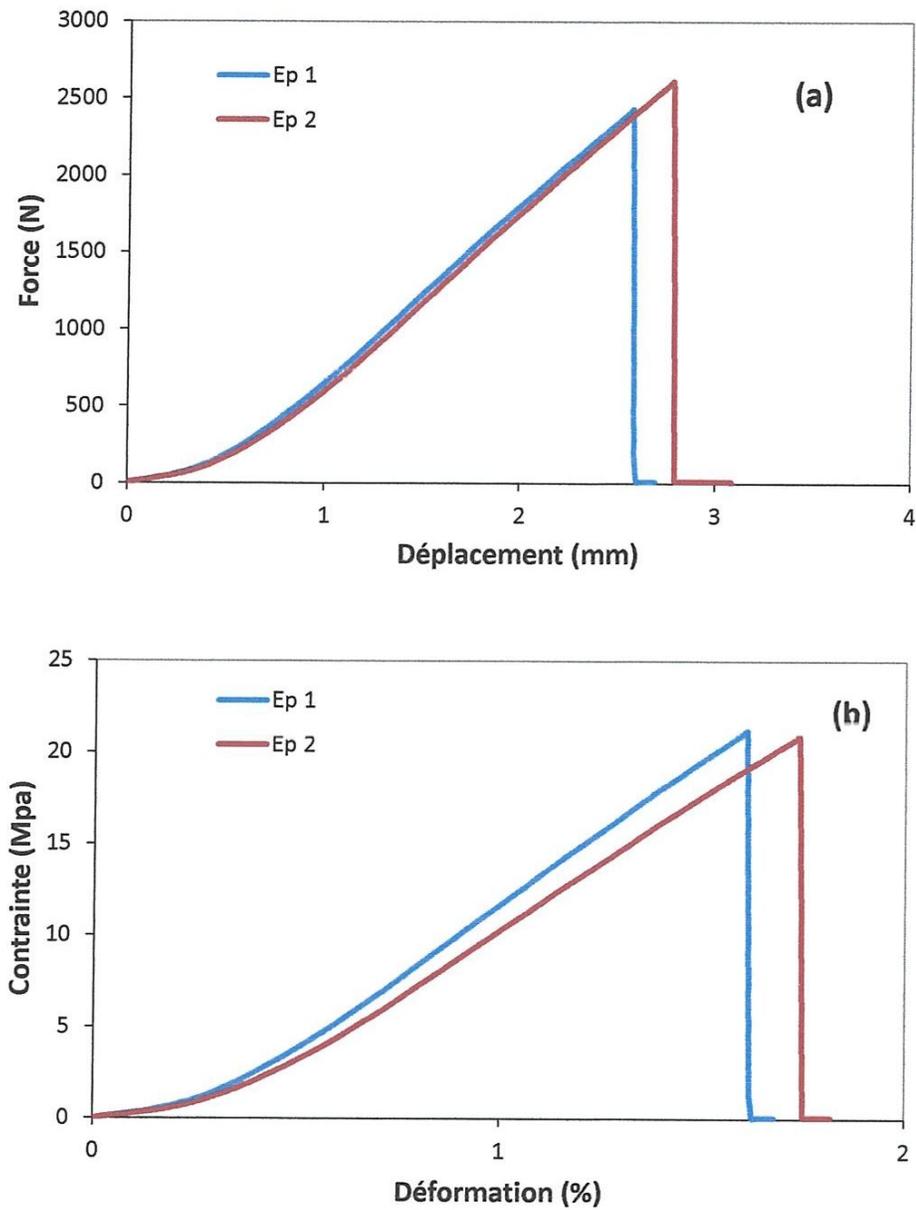


Figure III.17. Comportement (a) Charge/Déplacement et (b) Contraint/Déformation du composite C4PGT.

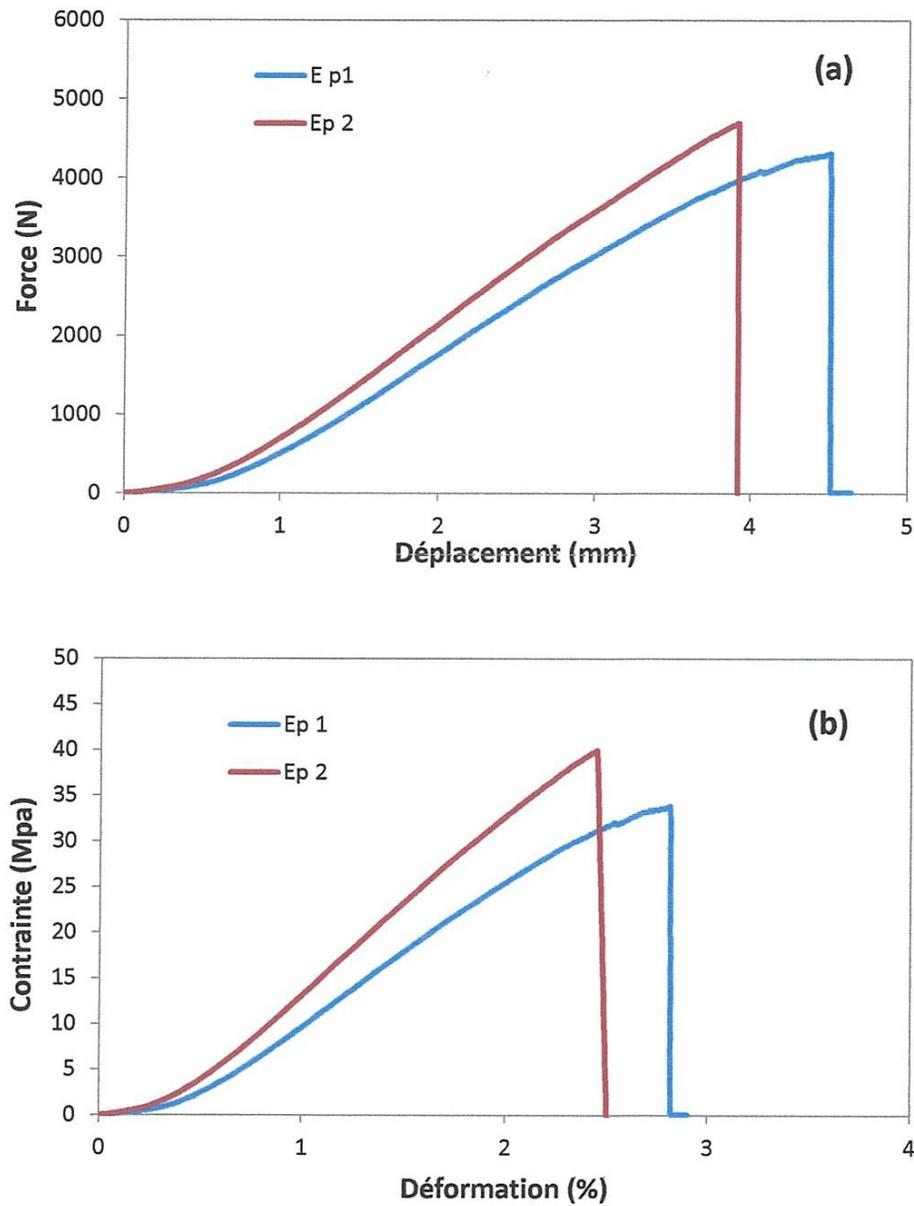
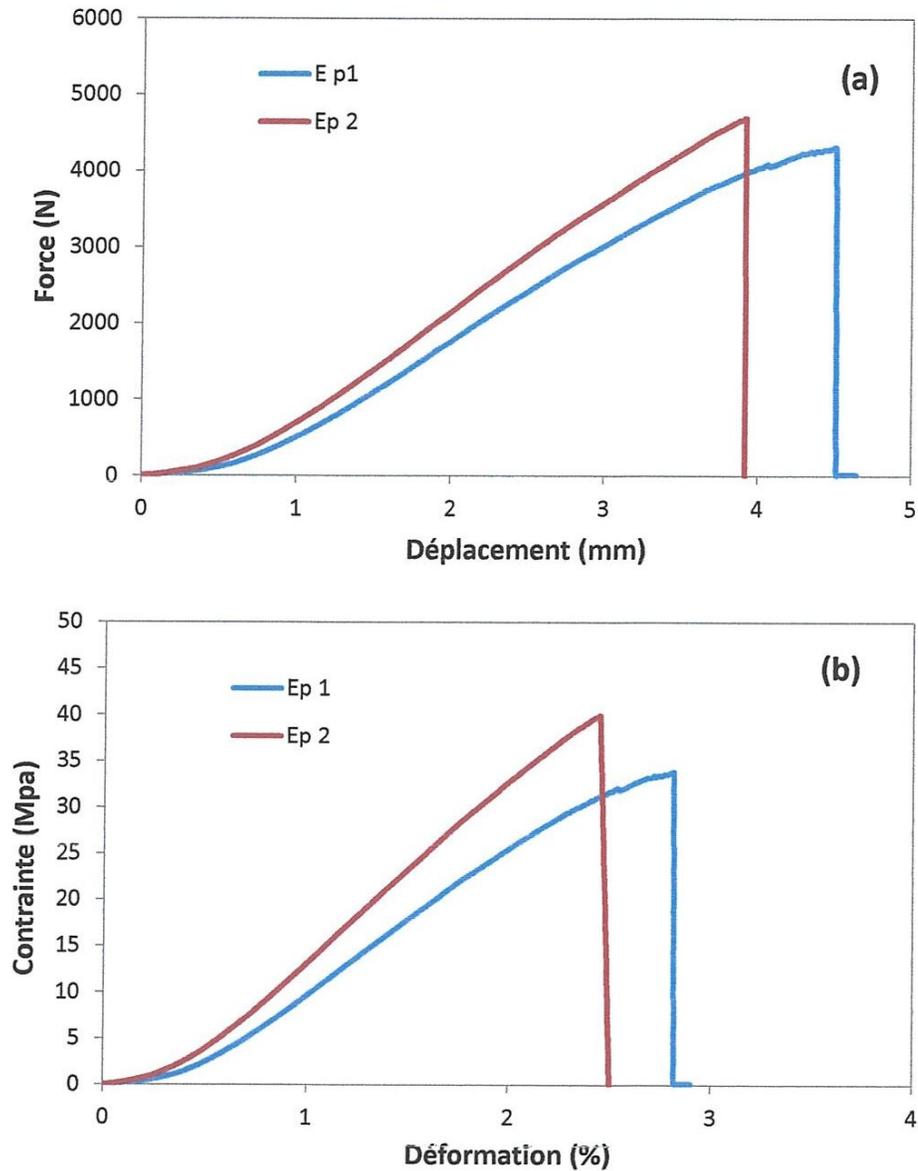


Figure III.18. Comportement (a) Charge/Déplacement et (b) Contraint/Déformation du composite C2PFT.



**Figure III.19.** Comportement (a) Charge/Déplacement et (b) Contraint/Déformation du composite C2PGT.

Les résultats obtenus se caractérisent par des dispersions malgré que ces éprouvettes sont issues d'une même plaque, ceci est dû d'une part à l'irrégularité des fibres des tissus de jutes, distribution non uniforme de la résine (travail artisanale), porosité, découpe des échantillons. De plus, les mèches d'un même tissu de jute ne possèdent pas les mêmes diamètres et longueurs et la fibre de jute entre les files de tissu coupé à cause du tortillage c'est-à-dire que le nombre de fibres de jute dans les mèches n'est pas constant.

Les courbes contrainte/déformation présentées dans les Figures III. 12b, 13b, 14b, 15b, 16b, 17b, 18b et 19.b son tracé pour s'affranchir du problème des dispersions des dimensions des éprouvette en tissu de jute.

Les contraintes  $\sigma$  et les déformations  $\varepsilon$  sont calculées par les expressions (III.1 et III.2).

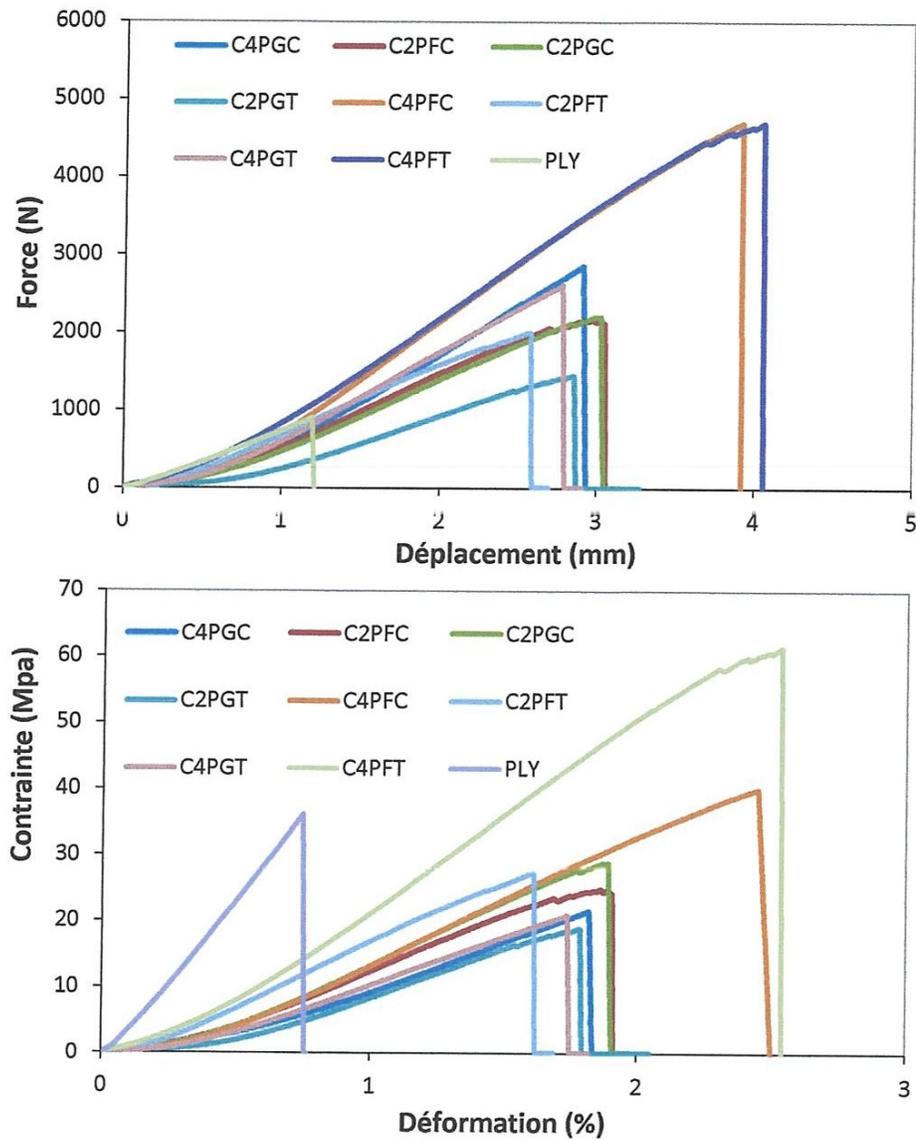
#### ***III.2.1.1. Courbe type des différents bio-composites (tissu de jute/polyester)***

La Figure III.20 représente les courbes types du comportement force/déplacement et contrainte/déformation des différents bio-composite étudié comparé avec la résine seule.

L'analyse des résultats obtenus montre que le meilleur comportement est obtenu pour le bio-composite 4 plis fin dans le sens de la trame (*C4PFT*) (figure III.20).

Ces résultats sont caractérisés par des dispersions dans la résistance à la traction qui est tout à fait caractéristique du ce composite. Ces dispersions peuvent être expliquées, par la distribution des défauts dans le tissu ou sur la surface de tissu ou encore différents types des renforts.

La comparaison des résultats expérimentaux obtenus avec ceux de la littérature est difficile du faite du type des renforts (tissus de jute), sens de découpe, dimension es éprouvettes de plaques bio-composite, des conditions climatiques du développement de ces plantes et des conditions d'essais notamment la vitesse de sollicitation et porosités entre les plaques. Néanmoins un résumé des résultats des essais de traction sur les composites jute/polyester sont présentés dans les Tableau III.2. Pour ce qui concerne les caractéristiques de la plante, l'âge, type de renfort (mécanisme de tissage et découpe de tissu) aussi bien que la microstructure de la fibre de fil de jute et la méthode de fabrication des plaques stratifiés.



**Figure III.20:** Courbes types du comportement (a) Charge/Déplacement et (b) Contraint/Déformation des bio-composites et de la résine.

Le Tableau III.1 représente les valeurs, moyenne avec leur écart type, obtenues des différents essais de traction des composites jute/polyester étudiés. Ces résultats montre que la contrainte à la rupture est la plus élevé (41,86MPa) est obtenu pour le bio-composite 4 plis fin selon le sens trame. Par contre, les déformations à la rupture les plus importantes (2,70MPa) sont obtenues pour le bio-composite 4 plis fin selon le sens chaîne. Le module de Young maximale (2116,56 MPa) est obtenu pour le bio-composite 2 plis gros selon le sens trame.

**Tableau III.1.** Caractéristiques mécaniques (déformation, contrainte et module de Young) des différents bio-composites (tissu de jute/polyester) obtenu expérimentalement par des essais de traction.

Ep	Caractéristiques mécaniques		
	$\epsilon_{rup}$ [%]	$\sigma_{rup}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
C4PFC	2,70±0,28	36,907±4,33	1649,33±289,00
C4PFT	2,27±0,38	41,86±27,65	1962±972,72
C4PGC	2,00±0,061	20,18±1,95	605,46±29,44
C4PGT	1,89±0,10	21,02±0,21	1504,2±106,9
C2PFC	1,98±0,051	27,07±2,77	1712,85±189,26
C2PFT	2,04±0,12	27,65±0,21	1966,35±126,3
C2PGC	2,00±0,06	25,48±9,30	1719,1±597,37
C2PGT	1,95±0,06	32,35±4,55	2116,56±338,12

Les dispersions dans le module de Young sont probablement dues à la variabilité dans la microstructure du bio-composite jute/polyester, des dommages possibles qui se sont produits pendant le procédé de découpe et du type du renfort. Une région non linéaire est observée, après la partie initiale entre 0,5 à 1 % de déformation de la courbe contrainte/déformation, pour certain échantillon testé (Figure III.12.b, 13.b, 14.b, 15.b, 16.b, 17.b, 18.b et 19.b).

La déformation à la rupture des bio-composite renforcé par tissu de jute varie avec le comportement du file dans le tissu, du type de tissu, du sens de la découpe, du nombre de plis et de la distribution de la résine. Ce comportement est lié aussi à la taille moyenne et à la distribution des imperfections dans le volume du tissu de jute et de la résine.

### III.3 Essais de flexion dans le sens de la chaîne du composite jute/polyester

Dans le cas des essais de flexion 3-points les stratifiés C4PFC et C4PGC en été testés sur au moins cinq éprouvettes pour chaque type, avec une vitesse d'essai de 2,5 mm/min. Les éprouvettes (Figure III.21) ont été découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, à partir des plaques de 320 mm x 320 mm selon la norme ASTM D3822-01, ces éprouvettes sont de dimensions :  $h = 5$  mm,  $L = 130$  mm,  $I = 100$  mm et  $l = 13$  mm, pour les deux composite C4PFC et C4PGC.

Où  $h$ ,  $L$ ,  $I$ ,  $l$  ; sont respectivement l'épaisseur, la longueur totale, la distance entre appuis et la largeur des éprouvettes.

**C4PFC:** Composite 4 plis Fin selon le sens Chaîne;

**C4PGC:** Composite 4 plis Gros selon le sens Chaîne.

La contrainte à la rupture en flexion est donnée par l'équation (III.3) :

$$\sigma = (3 \times F \times l) / (2 \times l \times h^2) \dots\dots\dots(III.3)$$

Où F : la force de rupture (N), l : la distance entre appuis (mm), l et h sont respectivement la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette.



Figure III.21: Essai de flexion des éprouvettes en stratifiés jute/polyester.

### III.3.1 Flexion des Composite stratifié jute/polyester

Les Figures III.22a et III.23a représentant les courbes de comportement charge/déplacement des composites stratifiés jute/polyester sollicités en flexion 3-points. Le module de flexion a été calculé pour des déplacements comprises entre 0,5 à 1 % selon la norme ASTM D3822-01 et les courbes contrainte/ déplacement sont présentés dans les Figures III.22b et III.23b.

Les résultats obtenus Figures III. 22 et III.23 se caractérisent par des dispersions assez faibles dans la première phase, alors que de fortes dispersions sont enregistrées juste avant et après la rupture des éprouvettes.

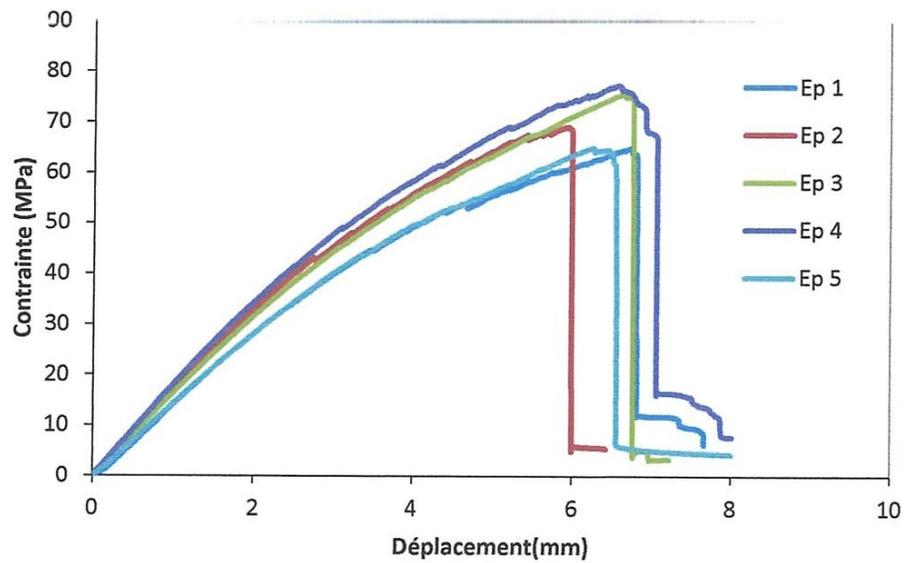
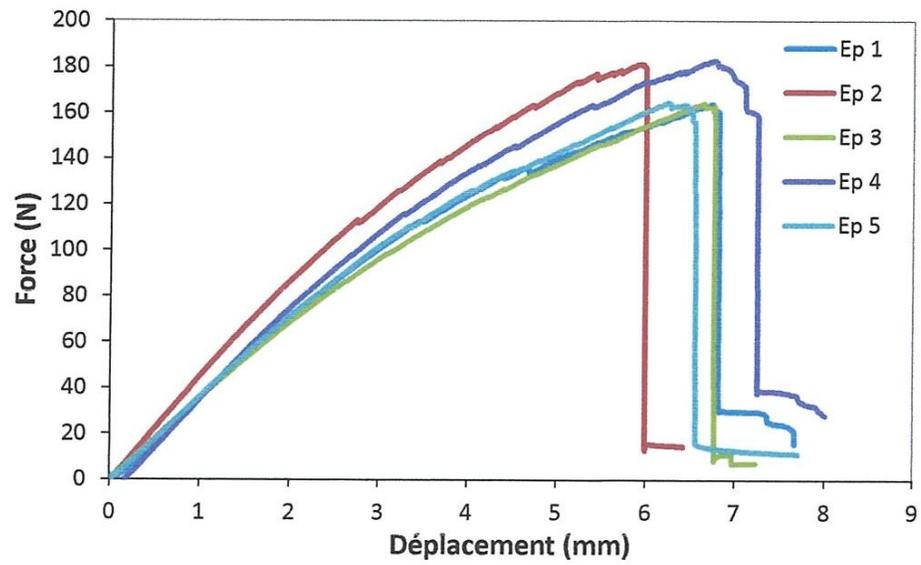


Figure III.22. Comportement du bio-composite C4PFC en flexion (a) charge/déplacement (b) contraint/déplacement.

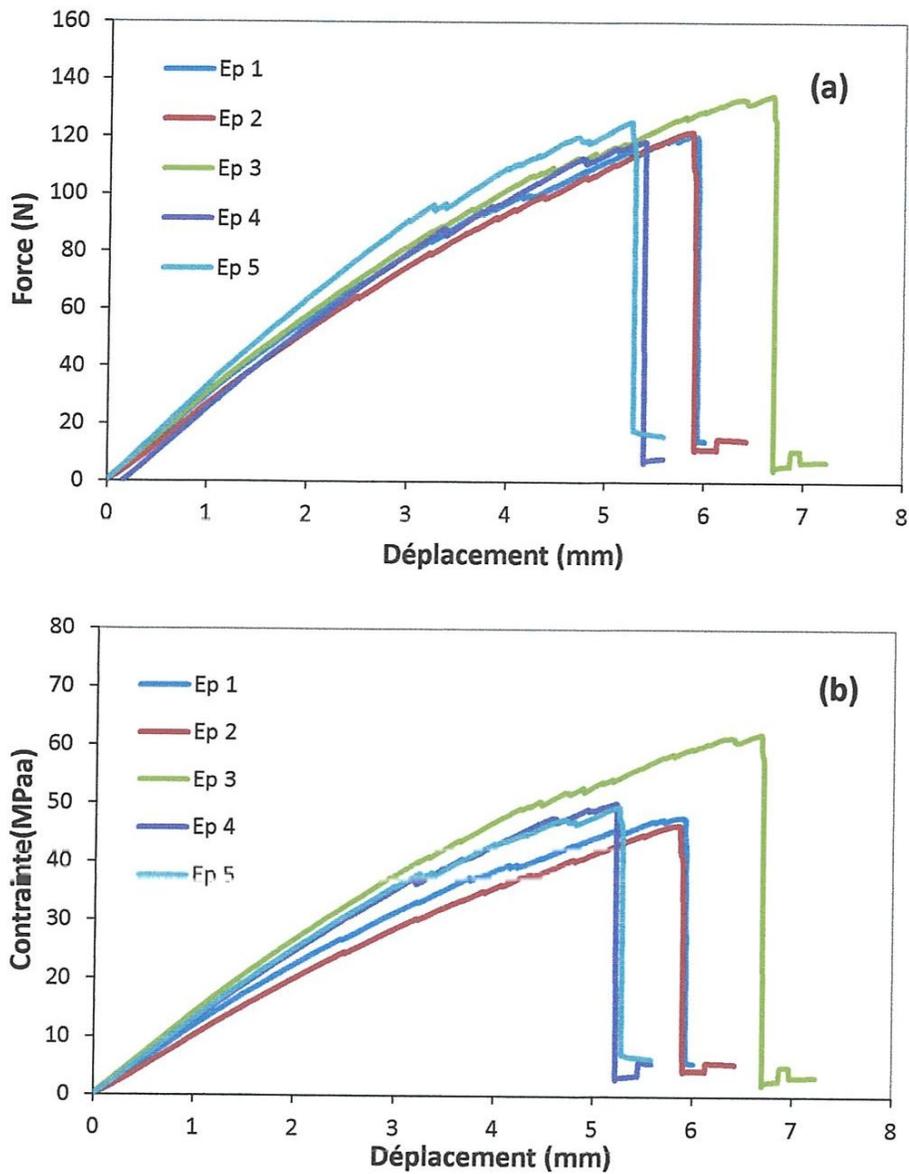
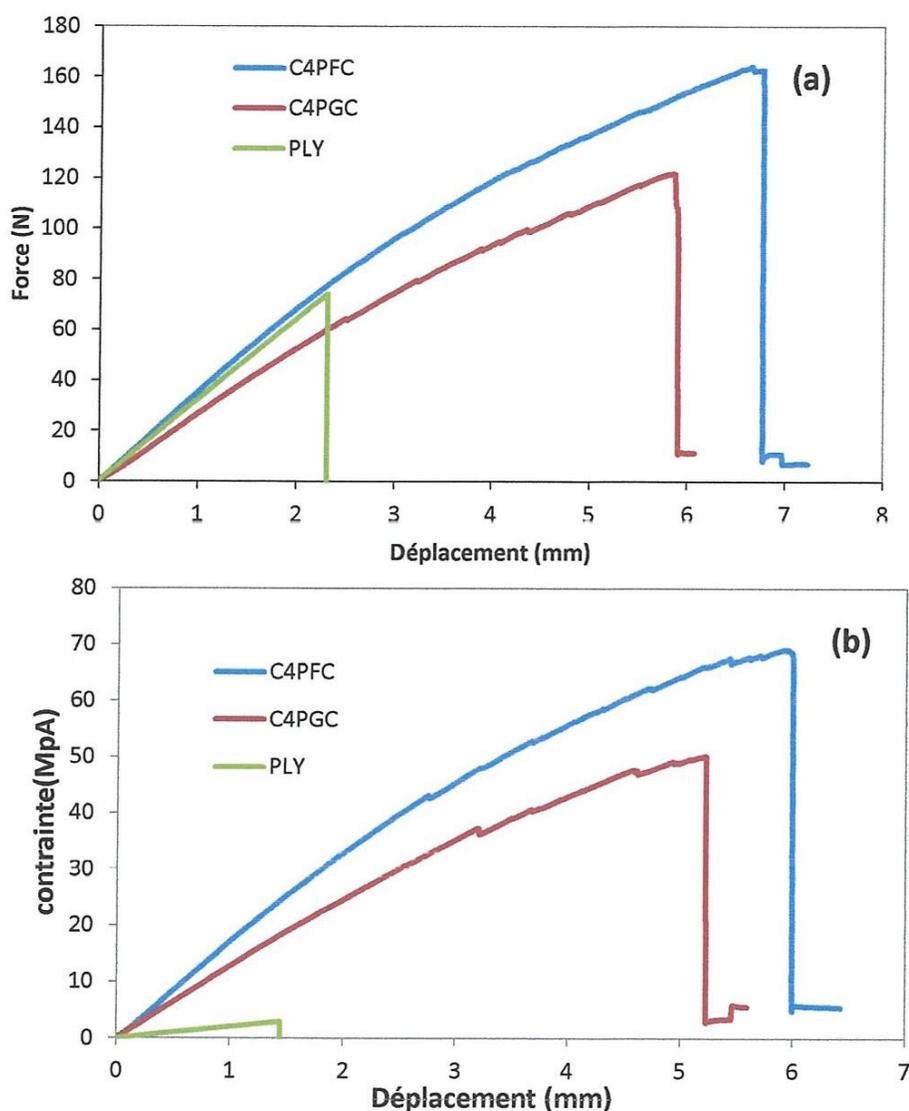


Figure III.23. Comportement du bio-composite C4PGC en flexion  
(a) charge/déplacement (b) contraint/déplacement.

### III.3.1.1. Courbe type de flexion des différents bio-composites (tissu de jute/polyester)

Les Figures III.24 représentent les courbes types charge/déplacement et contraint/déplacement des composites stratifiés renforcés par les tissu de jute et une résine polyester sollicité en flexion 3-points. Les deux stratifiés C4PFC et C4PGC se caractérisent par un comportement quasi linéaire jusqu'à la rupture. Il est important de signaler que le stratifié C4PFC est plus rigide et possède la charge et la flèche à la rupture beaucoup plus importante comparativement au stratifié C4PGC et à la résine (PLY).



**Figure III.24.** Courbes types du comportement des bio-composites et de la résine (a) Charge/Déplacement et (b) Contraint/ Déplacement.

Les propriétés mécaniques de toutes les éprouvettes testées en flexion trois points sont regroupés dans le tableau III.3. Les résultats obtenus montrent qu'il existe une variation dans les propriétés mécanique à la rupture (contrainte, déplacement et module de Young) pour les deux matériaux étudiés. Les dispersions enregistrées pour la contrainte et le déplacement à la rupture en flexion, sont liées à la variation des dimensions des éprouvettes, la distribution non uniforme de la résine dans les plis et à la non distribution uniforme des fibres dans les mèches. Les dispersions observées pour les modules de flexion sont généralement liées au type du tissu.

On remarque aussi que les stratifiés C4PFC sont plus rigides que les stratifiés C4PGC, ceci peut être due au procédé de tissage.

**Tableau III.3.** Caractéristiques mécaniques (déplacement, contrainte et module de Young) des différents bio-composites (tissu de jute/polyester) obtenu expérimentalement par des essais de flexion.

Ep	Caractéristiques mécaniques		
	$l_{rup}$ [mm]	$\sigma_{rup}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
C4PFC	$7,98 \pm 1,58$	$70,45 \pm 5,83$	$1664,1 \pm 133,19$
C4PGC	$6,17 \pm 0,68$	$51,24 \pm 6,25$	$1244,6 \pm 123,15$

L'analyse des résultats (Tableau III.3) montre que la contrainte, le module de Young et le déplacement à la rupture sont plus élevés pour le bio-composite 4 plus fin selon le sens chaîne soit : 70,45 MPa, 1664,1 MPa et 7,98 mm respectivement.

#### III.4 Résine

Les essais de traction et flexion ont été effectués jusqu'à la rupture des éprouvettes de la résine polyester (PLY).

Les essais de traction et flexion, sont effectués sur des éprouvettes de dimensions 250 x 25 x 3 mm et 130 x 13 x 3 mm, les dimensions des éprouvettes sont préparées selon les Normes **AFNOR 57-101** et **ASTM D3822-01** des essais de traction et flexion respectivement.

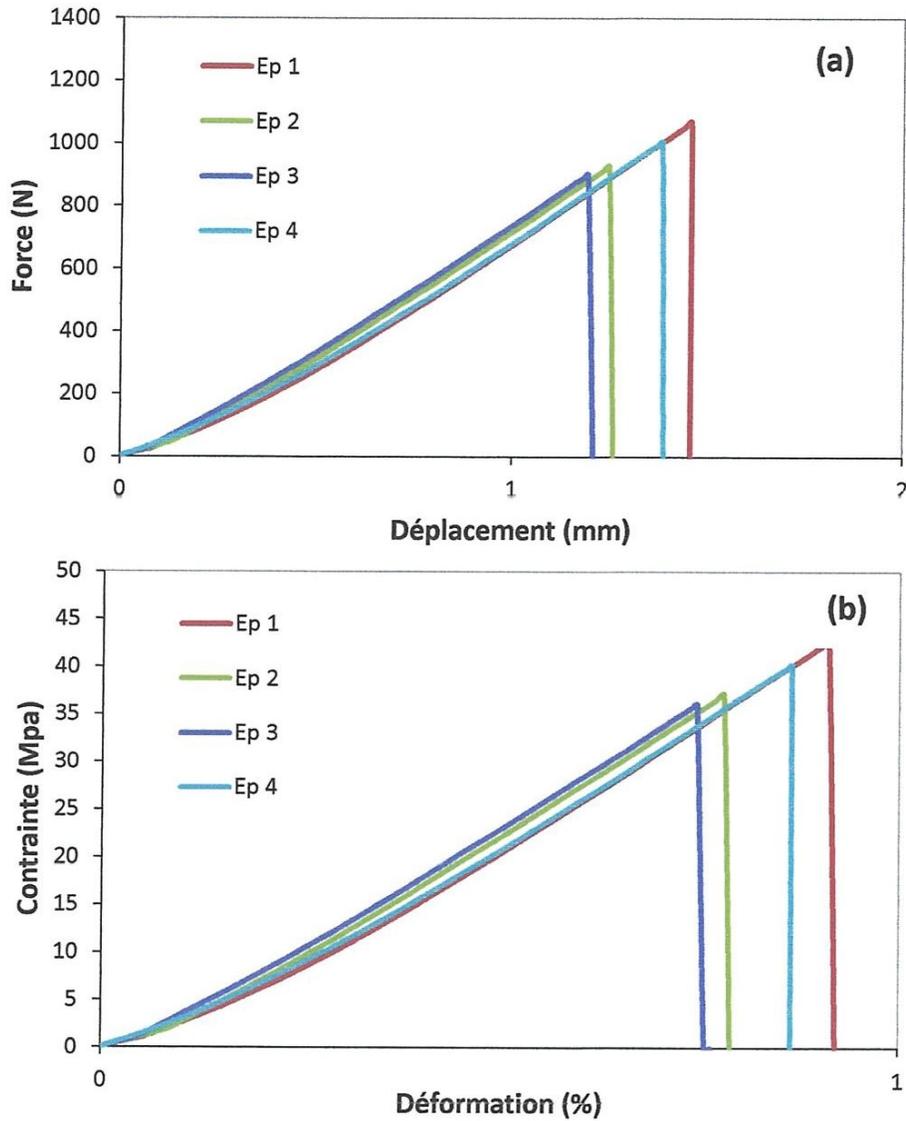
Afin de calculer les déformations on mesure les déplacements de la traverse de la machine.

La contrainte à la rupture en traction est calculée par l'équation (III.1).

Les contraintes à la rupture en flexion 3-points sont calculées par l'équation (III.3).

##### III.3.1 Essais de traction et de flexion de la résine polyester

Les Figures III.25a et 25b représentent les courbes de l'évolution force/déplacement qui se déroule en une seule phase quasi linéaire jusqu'à la rupture des éprouvettes. Le module longitudinal a été calculé pour des déformations comprises entre 0,5 à 1 % selon la norme **AFNOR 57-101**.



**Figure III.25.** Comportement mécanique de la résine polyester en traction (a) Charge/Déplacement et (b) Contraint/Déformation.

Les dispersions enregistrées de la force et du déplacement sont beaucoup plus grand comparativement a la rigidité (module de Young) (Figure III.25a).

Les Figures III.26 représentent les courbes charge/déplacement et contrainte/déplacement des composites stratifiés jute/polyester, sollicités en flexion 3-points. Le module de flexion a été calculé celons la norme ASTM D3822-01 et les principales caractéristiques mécanique obtenues sont regroupées dans le tableau III.4.

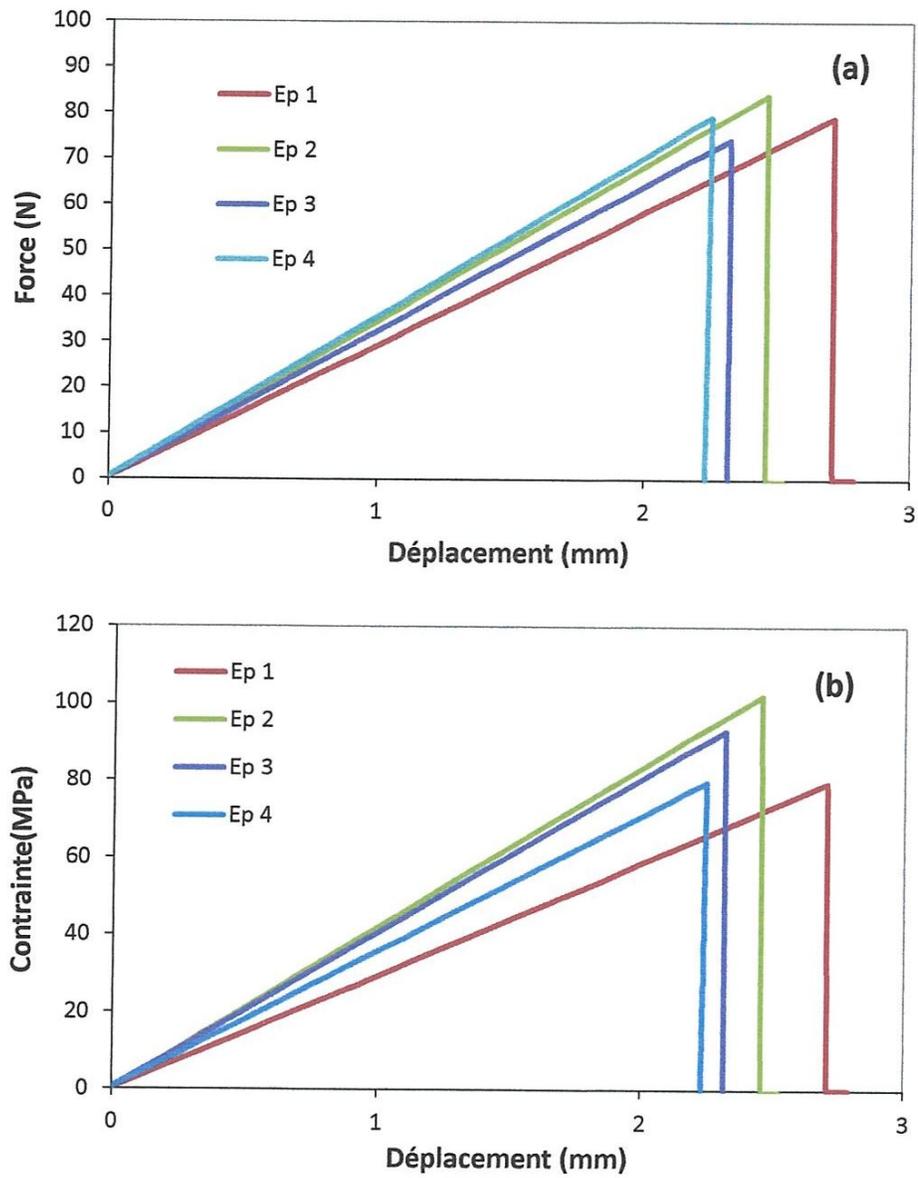


Figure III.26. Courbe de charge/déplacement et contraint/déformation des essais de flexion de la résine Polyester.

Les valeurs moyennes avec leur écart type obtenues lors des différents essais de traction et de flexion de la résine polyester (PLY) sont présentées dans le Tableau III.4.

**Tableau III.4.** Caractéristiques mécaniques (déformation, contrainte et module de Young) de la résine polyester obtenu expérimentalement par des essais de traction et de flexion.

Ep	Caractéristiques mécaniques			
	<i>l</i> (mm)	$\epsilon_{rup}$ [%]	$\sigma_{rup}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
<b>PLY à traction</b>	1,33 ± 0,10	0,83 ± 0,07	31,22 ± 17,65	3001,49 ± 2057,02
<b>PLY à flexion</b>	2,44 ± 0,23	1,55 ± 0,13	88,54 ± 11,05	3665,01 ± 582,60

Les résultats obtenus (Tableau III.4) montrent que la résine polyester possède des propriétés mécaniques (déplacement, déformation, contrainte à la rupture et module de Young) en flexion meilleur par rapport a ceux obtenus en traction.

### III.5. Conclusion

Partant d'une approche d'actualité basée sur une logique d'éco-conception et de mise en valeur de la gestion des ressources renouvelables, l'étude expérimentale sous chargement statique de deux types de tissu de jute ainsi sur des bio-composites élaborés à partir de ces tissu permet de dégager les conclusions suivantes :

L'étude du renfort naturel jute nous a permis dans un premier temps d'identifier l'influence de la découpe de tissu de jute (*sens chaine et trame*) sur le comportement en traction du tissu jute seule. Dans un deuxième temps, grâce aux essais mécaniques (traction et flexion) réalisés sur des composites stratifiés de type jute/polyester, qui ont montré certaines variabilités liées en grande partie au type du tissu, à son mode de tissage et au nombre de plis.

Les essais de traction et de flexion 3-points sur les composites stratifiés tissu de jute/polyester montrent que le comportement charge/déplacement est quasi linéaire jusqu'à la rupture des éprouvettes. La résine polyester utilisé pour les bio-composite est aussi testé en traction et en flexion.

## *Conclusion générale*

## Conclusion Générale

L'utilisation des fibres végétales (jute, palmier dattier, sisal, Agave, etc.) comme renfort dans les matériaux composite représente une voie prometteuse car elle permet l'amélioration l'ensemble des propriétés mécanique des matériaux bio-composites. Le travail effectué dans le cadre ce mémoire de Master permet de dégagé les conclusions suivantes :

- Dans le chapitre I est décrit les principales fibres naturelles utilisées comme renfort dans les matériaux composites ;

- d'après l'étude bibliographique faite, les traitements chimique par un alcalin (NaOH, etc.) des fibres naturelles permettent d'amélioré les propriétés mécanique et l'interface fibre/matrice ;

- Les résultats des essais mécaniques des tissus bidirectionnel en fibres de jute réveillent d'importante dispersions d'où la nécessité d'évalué les caractéristiques mécaniques (contrainte et module de Young) par une méthode statistique ;

- Le tissu de jute fin sollicité en traction dans le sens de la trame possèdent les meilleurs propriétés mécanique ;

- Le comportement en traction et en flexion de la résine et des bio-composites est en une seule phase quasi linéaire jusqu'à la rupture brutale des échantillons ;

- Tout les bio-composites possèdent des caractéristiques mécaniques meilleur par rapport a la résine seule ;

- L'influence du nombre de plis sur les propriétés mécanique en traction a été étudiés ;

- Le bio-composite renforcé par tissu de jute fin dans sens de la chaine sollicité en flexion possède les meilleurs caractéristiques mécaniques par rapport au autres composites étudiés.

## *Références bibliographiques*

## Référence bibliographique

- [1] Mansour Rokbia, Hocine Osmani, Abdellatif Imad, Nouredine Benseddiq. Effect of Chemical treatment on Flexure Properties of Natural Fiber-reinforced Polyester Composite. *Procedia Engineering* 10 (2011) 2092–2097.
- [2] Mishra S, AK Mohanty, Drzal LT, Misra M, Parija S. Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites. *Compos Sci Technol* 2003; 63:1377–85.
- [3] Bledzki AK, Gassan J. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Prog Polym Sci* 1999; 24: 221–74.
- [4] Mariam A. AlMaadeed, Ramazan Kahraman, P. Noorunnisa Khanam, Nabil Madi. Date palm wood flour/glass fibre reinforced hybrid composites of recycled polypropylene: Mechanical and thermal properties. *Materials and Design* 42 (2012) 289–294.
- [5] Cui Yi Hua, Tao Jie. Fabrication and mechanical properties of glass fibre reinforced wood plastic hybrid composites. *J Appl Polym Sci* 2009; 112(3):1250–7.
- [6] Kord Behzad, Hosseini Kiakajouri Syed Mohsen. Effect of nano clay dispersion on physical and mechanical properties of wood flour/poly propylene/glass fibre hybrid composites. *Bio Resour* 2011; 6(2):1741–51.
- [7] Lin Qunfang, Zhou Xiaodong, Dai Gance, Bi Yiemao. Some studies on mechanical properties of wood flour/continuous glass mat/polypropylene composite. *J Appl Polym Sci* 2002; 85:536–44.
- [8] Tasdemir Munir, Biltekin Hasan, Caneba Gerald T. Preparation and characterization of LDPE and PP-wood fibre composites. *J Appl Polym Sci* 2009;112:3095–102.
- [9] Valente Macro, Sarasini Fabrizio, Marra Francesco, Tirillo Jacopo, Pulci Giovanni. Hybrid recycled glass fibre/wood flour thermoplastic composites: manufacturing g and mechanical characterization. *Composites A* 2011;42:649–57.
- [10] John LuZ, Quinglin Wu, Negulescu Ioan I, Chen Yan. The influence of fibre feature and polymer melt index on mechanical properties of sugarcane fibre/ polymer composites. *J Appl Polym Sci* 2006;102:5607–19.
- [11] Son Jungil, Yang Han-Seung, Kim Hyun-Joong. Physico-mechanical properties of paper sludge-thermoplastic polymer composites. *J Thermoplast Compos Mater* 2004; 17(6):509–22.
- [12] F.Z. Arrakhiz , M. El Achaby , M. Malha , M.O. Bensalah , O. Fassi-Fehri , R. Bouhfid ,K. Benmoussa A. Qaiss Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: Doum/low density polyethylene: *Materials and Design* 43 (2013) 200–205
- [13] Moyeenuddin A, Sawpan K, Pickering L, Fernyhough A. Effect of various chemical treatment on the fibre structure and tensile properties of industrial hemp fibres. *Compos Part A-Appl S* 2011;42:888–95. [14] Arrakhiz FZ, El Achaby M, Kakou CA, Vaudreuil S, Benmoussa K, Bouhfid R, et al. Mechanical properties of high density polyethylene reinforced with chemically modified Coir fibers: impact of chemical treatments. *Mater Design* 2012; 37:379–83.
- [15] Dai D, Fan M. Investigation of the dislocation of natural fibers by fourriertransform infrared. *Vib Spectrosc* 2011; 55:300–6.
- [16] Bessadok A, Marais S, Gouanve F, Colasse L, Zimmerlin I, Roudesli S, et al. Effect of chemical treatments of Doum (*Stipa tenacissima*) fibres on water-sorption properties. *Compos Sci Technol* 2007; 67:685–97.

- [17] Olsson AM, Salmen L. The association of water to cellulose and hemicellulose in paper examined by FTIR spectroscopy. *Carbohydr Res* 2004; 339:813–8.
- [18] Beckermann GW, Pickering KL. Engineering and evaluation of hemp fibre reinforced polypropylene composites: fibre treatment and matrix modification. *Compos Part A-Appl S* 2008; 39:979–88.
- [19] Arnal ML, Balsamo V, Ronca G, Sánchez A, Müller AJ, Cañizales E, et al. Applications of successive self-nucleation and annealing (SSA) to polymer characterization. *J Therm Anal Calorim* 2000; 59:451–70.
- [20] Munaro M, Akcelrud L. Correlations between composition and crystallinity of LDPE/HDPE blends. *J Polym Res* 2008; 15:83–8.
- [21] Ku H, Wang H, Pattarachaiyakoop N, Trada M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymers composites. *Compos Part B-Eng* 2011; 42:856–73.
- [22] Mohanty AK, Misra M, Drzal LT, Selke SE, Harte BR, Hinrichsen G. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites. 1st ed. *Taylor and Francis, Group: Springer; 2005*.
- [23] Arrakhiz FZ, El Achaby M, Benmoussa K, Bouhfid R, Essassi EM, Qaiss A. Evaluation of mechanical and thermal properties of Pine cone fibers reinforced compatibilized polypropylene. *Mater Design* 2012; 40:528–35.
- [24] Cerqueira EF, Baptista CARP, Mulinari DR. Mechanical behaviour of polypropylene reinforced sugarcane bagasse fibers composites. *Procedia Eng* 2011;10:2046–51.
- [25] Tran Huu N, Shinji O, Nguyen HT, Satoshi K. Effect of alkali treatment on interfacial and mechanical properties of coir fiber reinforced poly (butylene succinate) biodegradable composites. *Compos Part B-Eng* 2011;42:1648–56.
- [26] Brahmakumar R, Pavithran C, Pillai RM. Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. *Compos Sci Technol* 2005; 65:563–9.
- [27] Prasad SV, Pavithran C, Rohatgi PK. Alkali treatment of coir fibers for coir– polyester composites. *J Mater Sci* 1983; 18:1443–54.
- [28] B.F. Abu-Sharkh, H. Hamid Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis *Polymer Degradation and Stability* 85 (2004) 967e973
- [29] Ahmad Alawar, Ahmad M. Hamed, Khalifa Al-Kaabi. Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement *Composites: Part B* 40 (2009) 601–606.
- [30] Jimenez AZaEJA. *ROMA (IT); 1999. p. 15*
- [31] Al-Kaabi K. Graduate Studies Collage. Al-Ain: *United Arab Emirates University; May/2004*.
- [32] Al-Khanbashi A, Al Kaabi K, Hammami A. *Wiley Intersci Polym Comp* 2005:486–97. 10.1002/pc.20118.
- [33] Kaddam H, Dufresne A, Khelifi B, Bendahou A, Taourirte M, Raihane M, et al. Short palm tree fibers – Thermoset matrices composites. *Composites: Part A* 2006;37:1413–22.
- [35] Mohanty AK, Misra M, Hinrichsen G. *Biofibres Mater Eng* 2000;276/277:1–24.
- [36] Bledzki K, Gassan J. *Prog Polym Sci* 1999;24:221–74.
- [37] Baley C. *Comp A* 2002;33:939–48.
- [38] [www.Wikipedia.com](http://www.Wikipedia.com)
- [39] [http://www.freewebs.com/jute\\_kenaf\\_roselle/](http://www.freewebs.com/jute_kenaf_roselle/).

- [40] A. Belaadi, A. Bezazi, M. Bourchak, F. Scarpa. Extraction et caractérisation mécanique des fibres naturelles : *Agave americana* L. Colloque International sur les Matériaux et le Développement Durable (CIMDD'2013) 6-9 Mai, 2013. Université M'Hamed Bougara Boumerdes
- [41] Abdallah MIR, *Etude mécanique, thermomécanique et hygrothermique d'un matériau composite sandwich à âme en liège et peaux en jute/époxy. Thèse de doctorat soutenue le 20 / 06 / 2010. UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES.*
- [42] W. Weibull. A statistical theory of the strength of materials. *Ing Vetenskaps Akad Handl*, vol. 151. Stockholm; 1939.
- [43] L. Peponi, J. Biagiotti, L. Torre, J.M. Kenny, I. Mondragòn. Statistical analysis of the mechanical properties of natural fibers and their composite materials. Natural fibers. *Polym Compos* 29 (2008)
- [44] F. A. Silva, N. Chawla, R. D. T. Filho. Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. *J of Composites Science and Technology* 68 (2008) 3438–3443.
- [45] J-M. Park, S.T. Quang, B-S. Hwang, KL. DeVries. Interfacial evaluation of modified Jute and Hemp fibers/polypropylene (PP)–maleic anhydride polypropylene copolymers (PP–MAPP) composites using micromechanical technique and nondestructive acoustic emission. *Compos Sci Technol* 66 (2006) 2686–99.
- [46] J. Andersons, E. Sparmins, R. Joffe, L. Wallström Strength distribution of elementary flax fibres. *Compos Sci Technol* 65 (2005) 693–702.