

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



LABORATOIRE DES SCIENCES ET
TECHNIQUES DE L'ENVIRONNEMENT

Département de Génie de l'Environnement

Laboratoires des Sciences et Techniques de l'Environnement (LSTE)

**Mémoire de projet de fin d'études en vue de
l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie
de l'Environnement**

Intitulé du thème :

**Etude de l'effet de différentes techniques de préparation
sur les propriétés des matériaux composites biosourcés**

Présenté et soutenu publiquement le 13/10/2022 par :

MISSOUM Ali Abderraouf

Devant le jury composé de :

Président	M. YACINE KERCHICH	Pr	ENP
Examineurs	M. SADJIA AROUA	MCB	ENP
Promoteurs	M. ZOUHEYR BELOUADAH	MCA	ENP
	Mme NAIMA BELHANECHÉ	Pr	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique d'Alger



Département de Génie de l'Environnement
Laboratoires des Sciences et Techniques de l'Environnement (LSTE)

Mémoire de projet de fin d'études en vue de
l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie
de l'Environnement

Intitulé du thème :

Etude de l'effet de différentes techniques de préparation
sur les propriétés des matériaux composites biosourcés

Présenté et soutenu publiquement le 13 /10/2022 par :

MISSOUM Ali Abderraouf

Devant le jury composé de :

Président	M. YACINE KERCHICH	Pr	ENP
Examineurs	M. SADJIA AROUA	MCB	ENP
Promoteurs	M. ZOUHEYR BELOUADAH	MCA	ENP
	Mme NAIMA BELHANECHÉ	Pr	ENP

ملخص: تهدف هذه الدراسة الحالية إلى تصميم مواد مركبة تعتمد على البوليستيرين PS المقوى بألياف نباتية من نبات اللوفا وذلك بطريقة الضغط الحراري. تم إنتاج هذه المركبات بعد معالجة ألياف Luffa بمعالجتين كيميائيتين: المعالجة بمحلول الصوديوم NaOH أو بمحلول برمنغنات البوتاسيوم $KmNO_4$ ، ثم ضغطهم مع التغيير في عدد طبقات الألياف النباتية من 1 إلى 3. تم أخذ عينات بعد تكوين الألواح المركبة ثم تعريضهم لاختبارات مختلفة وهي كالتالي: التحليل الطيفي FTIR-ATR وقياسات الكثافة والدراسة المجهرية بالإضافة لاختبار الشد. تسمح لنا البيانات التي تم الحصول عليها باستنتاج أن أوراق Luffa يمكن أن يكون لها تطبيق مفيد وملاموس ومرجح في مختلف مجالات التصنيع والبناء.

الكلمات المفتاحية: ألياف نباتية، المواد المركبة، اللوفا، البوليستيرين، اختبار الشد.

Abstract: This study aims to design composite materials based on polystyrene PS reinforced with plant fibers from the Luffa plant and this by the thermocompression method. These composites were produced after having treated the Luffa fibers with two distinct chemical treatments: NaOH or $KmNO_4$ treatment, then compressed by varying the number of layers of fibers from 1 to 3. Samples were taken after the formation of the composite plates and subjected to various tests which are as follows: FTIR-ATR spectroscopy, density measurements, morphological analysis and tensile test. The obtained results allow us to conclude that the sheets of Luffa can have a useful, concrete and, profitable application in different fields of manufacture and construction.

Keywords: Plant fibers, composites materials, Luffa, Polystyrene, Tensile test.

Résumé : Cette présente étude a comme objectif de concevoir des matériaux composite à base de polystyrène PS renforcé avec des fibres végétales issues de la plante de Luffa et ceci par la méthode de thermocompression. Ces composites ont été réalisés après avoir traité les fibres de Luffa à deux traitements chimiques distincts : traitement au NaOH ou au $KmNO_4$, puis comprimés en variant le nombre de couches des fibres végétales de 1 jusqu'à 3. Des échantillons furent prélevés après formation des plaques composites puis soumis à différents tests qui sont les suivants : l'essai de traction, la spectroscopie FTIR-ATR, des mesures de densité et une étude microscopique. Les résultats obtenus nous permettent de conclure que les feuilles de Luffa peuvent avoir une application utile, concrète et rentable dans différents domaines de fabrication et de construction.

Mots clés : Fibre végétale, Matériaux composites, Luffa, Polystyrène, Traction.

Remerciements

Tous nos remerciements et toute notre gratitude reviens entièrement et avant tout à Allah tout puissant pour avoir permis à ce travail de porter fruit.

Ce Projet de Fin d'Etudes a été réalisé, au sein du Laboratoire des Science et Techniques (LSTE) de l'Environnement au sein de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger dirigé par Madame Professeur N. BELHANECHÉ.

Ainsi, je tiens à exprimer ma sincère gratitude et reconnaissances à mes encadreurs, Dr Zouheyr BELOUADAH et Professeur Naima BELHANECHÉ pour leurs aides et leurs soutient constant tout au long de ce long travail et leurs précieux enseignements.

Je remercie aussi les membres du jury ici présent pour leur contribution et leur apport en évaluant cette recherche scientifique.

Aussi, nous remercions le département du Génie Mécanique de l'ENP pour nous avoir permis d'y mener une partie des œuvres nécessaires à la réalisation de ce travail, en particulier le chef de département M. Yacine BELKACEMI. et M. LAHLAH Karim Ingénieur du FABLAB et de laboratoire de mécanique au département du génie mécanique à l'ENP, de même aussi nous n'oublierons pas la participation à ce projet de M. Mahieddine, ingénieur du laboratoire LSTE et M. Reda l'ingénieur du laboratoire QHSE à l'ENP.

Nous remercions aussi l'atelier DJOUDI Metal à Dergana pour leur précieuse aide afin de terminer la construction de l'appareillage crucial pour cette étude : la presse thermique.

Nous remercions aussi vivement le Dr. Amine REZOUG chercheur au centre de recherche des technologies industrielles « CRTI ».

Par ailleurs, je salue et je remercie aussi vivement ma camarade Yousra de la promotion du génie environnement 2021/2022 pour son aide très appréciée lors des toutes dernières finalisations de ce projet.

Et enfin mais surtout, j'exprime ma plus profonde gratitude envers ma chère famille qui n'a cessé de me soutenir et d'être à mes côtés à chaque étape de ma vie sans jamais rien demander en retour.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Liste des symboles

<i>Introduction Générale</i>	11
<i>Chapitre I: Etude Bibliographique</i>	15
<i>1.1 Définition d'un composite</i>	15
<i>1.2 Avantages et Inconvénients majeurs des composites</i>	17
<i>1.3 Types de composites</i>	17
<i>1.4 La matrice</i>	18
<i>1.4.1 Les composites à matrice thermoplastique TP</i>	19
<i>1.4.2 Les composites à matrices thermodurcissables TD</i>	20
<i>1.5 Les Elastomères</i>	21
<i>1.6 Comparaison des matrices</i>	22
<i>1.7 Le renfort</i>	22
<i>1.8 Applications des bio composites</i>	24
<i>1.9 Généralités sur les propriétés biologiques de la cellule végétale</i>	25
<i>1.10 La Cellulose</i>	27
<i>1.11 Avantage et inconvénients des fibres végétales</i>	27
<i>1.12 Quelques procédés d'élaboration</i>	28
<i>1.12.1 Moulage sous vide</i>	28
<i>1.12.2 Moulage par centrifugation</i>	29
<i>1.12.3 La thermocompression</i>	30
<i>Chapitre II : Matériels & Méthodes</i>	32
<i>2.1 La fibre de Luffa</i>	32
<i>2.2 Polystyrène</i>	34
<i>2.2.1 Définition</i>	34
<i>2.2.2 Catégories de polystyrène</i>	35
<i>2.2.4 Les propriétés du polystyrène</i>	35
<i>2.2.5 Application du polystyrène</i>	36
<i>2.2.6 Polystyrène et Environnement</i>	36
<i>2.3 Matériels et des ressources utilisées</i>	36
<i>2.3.1 Préparation des Feuilles de Luffa</i>	37
<i>2.3.2 Traitement chimique des feuilles de Luffa</i>	39
<i>2.3.3 Méthode de traitements des feuilles de Luffa</i> :	40

2.4 Méthode d'élaboration des plaques composites biosource à l'aide de la presse thermique	41
2.4.1 Préparation du moule et l'empilement des plis	41
2.4.2 Mise en œuvre de la presse thermique	42
2.5 Analyse spectroscopique infrarouge à Transformée de Fourier en mode Réflexion Totale Atténuée (FTIR-ATR)	46
2.6 Découpage Laser	46
2.7 Dimensions des éprouvettes obtenues	48
2.8 Test de Traction	50
2.9 Microscopie optique	51
2.10 Mesure de la densité (méthode de la double pesée)	51
Chapitre III : Résultats & Discussion	54
3.1 Calcul du taux de fibre obtenu	54
3.2 Analyse morphologique de la fibre	54
3.3 Analyse spectroscopique infrarouge à Transformée de Fourier en mode Réflexion Totale Atténuée (FTIR-ATR)	56
3.4 Test de Traction	58
3.4.1 Module de Young	58
3.4.2 Contrainte Maximale	60
3.4.3 Déformation	63
3.5 Microscopie optique	65
3.6 Mesure de la densité (méthode de la double pesée)	69
Conclusion	72
Bibliographie	75

Liste de figures

Figure 1 Eléments constitutifs d'un composite	15
Figure 2 Schéma de la structuration d'un matériau composite.....	16
Figure 3 Types de matériaux composites. (a) avec particules, (b) avec fibres, (c) laminaire....	17
Figure 4 Catégories des différentes sortes de polymères.	19
Figure 5 Schéma des renforts existants.....	23
Figure 6 Evolution de l'émission des gaz polluants en fonction des années [Réseau Action Climat France, 2011].....	25
Figure 7 La chaine de cellulose Formule brute: $[C_6H_{10}O_5]_n$	27
Figure 8 Mécanismes du moulage sous vide.....	28
Figure 9 Mécanismes du moulage par centrifugation	29
Figure 10 Schéma récapitulatif du procédé de thermocompression	30
Figure 11 Coupe transversale d'une feuille de Luffa	33
Figure 12 Coupe longitudinale d'une feuille de Luffa.....	33
Figure 13 Imagerie optique de la structure morphologique de la fibre de Luffa	34
Figure 14 Etat de la fibre de Luffa avant ouverture	37
Figure 15 Etat de la fibre de Luffa après ouverture	38
Figure 16 Feuilles de Luffa découpées en formes de carrés avant pression	39
Figure 17 Feuilles de Luffa découpées en formes de carrés après pression	39
Figure 18 Bac usité afin d'effectuer le traitement chimique des feuilles de Luffa.....	41
Figure 19 Etapes de la fabrication des plaques de composites : le garnissage en PS.....	43
Figure 20 Etapes de la fabrication des plaques de composites : Fabrication de la plaque vierge.....	43
Figure 21 Etapes de la fabrication des plaques de composites : thermocompression	44
Figure 22 Plaques obtenues par thermocompression.....	44
Figure 23 Plaque vierge obtenue par thermocompression.....	45
Figure 24 Plaque de fibre traitée au NaOH de 2 plis obtenue par thermocompression	45
Figure 25 Spectroscopie IRTF-ATR.....	46
Figure 26 Machine de découpage Laser du Fablab de l'ENP	47
Figure 27 Machine de découpage laser mise en marche.....	47
Figure 28 Découpage des éprouvettes de type haltère sur la plaque de NaOH de 2 plis	48
Figure 29 Eprouvette de traction (Norme ASTM D638)	48
Figure 30 Machine utilisé pour l'essai de traction.....	51
Figure 31 Appareillage de la mesure de densité.....	52
Figure 32 Morphologie du Luffa traitée au NaOH avec un objectif X0.67.....	55
Figure 33 Morphologie du Luffa non traité avec un objectif X50	55
Figure 34 Morphologie du Luffa traitée au $KMnO_4$ avec un objectif X50.....	55
Figure 35 Morphologie du Luffa traitée au NaOH avec un objectif X50.....	56
Figure 36 Morphologie du Luffa traitée au NaOH avec un objectif x 0.9.....	56
Figure 37 Spectre FTIR-ATR de la fibre Luffa traitée au $KMnO_4$	57
Figure 38 Histogramme comparatif des valeurs moyennes du module de Young entre la plaque vierge et les plaques de 1 pli	59
Figure 39 Histogramme comparatif des valeurs moyennes du module de Young entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis.....	59
Figure 40 Histogramme comparatif des valeurs moyennes du module de Young entre la plaque vierge et les plaques de 3 plis.....	60
Figure 41 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de la contrainte maximale entre la plaque vierge et les plaques de 1 pli	61

<i>Figure 42 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de la contrainte maximale entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 43 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de la contrainte maximale entre la plaque vierge et les plaques de 3 plis.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 44 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de la déformation entre la plaque vierge et les plaques d'un pli.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 45 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de la déformation entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 46 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de la déformation entre la plaque vierge et les plaques de 3 plis.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure 47 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leur rupture : plaque vierge.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure 48 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leur rupture : Plaque traitée au NaOH 1 Pli.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 49 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leurs ruptures : Plaque traitées au NaOH 2 Plis.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 50 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leurs ruptures : Plaque traitées au NaOH 3 Plis.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 51 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leurs ruptures : Plaque traitées au KMnO4 1 Pli.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 52 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leurs ruptures : Plaque traitées au KMnO4 2 Plis.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 53 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leurs ruptures : Plaque traitées au KMnO4 3 Plis.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 54 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de densité entre la plaque vierge et les plaques de 1 pli.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 55 Tableau comparatif des valeurs moyennes de densité entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis.....</i>	<i>70</i>

Liste des Tableaux

<i>Tableau 1 avantages et inconvénients des composites.....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 2 Propriétés des thermoplastiques</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 3 Propriétés des thermodurcissables</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 4 Comparaison caractéristiques des principales matrices polymères</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 5 Comparaison caractéristiques physico-chimique des principales matrices polymères</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 6 Propriétés physico-chimique de la fibre de Luffa.....</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 7 Répartition du nombre et du type de plaque à réaliser pour l'étude.....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 8 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque traitée au NaOH de 1 pli.....</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 9 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque traitée au NaOH de 2 plis</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 10 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque traitée au NaOH de 3 plis</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 11 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque traitée au KMnO₄ de 1 pli</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 12 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque traitée au KmNO₄ de 2 plis.....</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 13 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque traitée au KmNO₄ de 3 plis.....</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 14 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque vierge.....</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 15 Masse des plaques avant et après thermocompression et taux de fibre</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 16 Tableau comparatif des valeurs moyennes du module de Young entre la plaque vierge et les plaques de 1 pli</i>	<i>58</i>
<i>Tableau 17 Tableau comparatif des valeurs moyennes du module de Young entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis.....</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 18 Tableau comparatif des valeurs moyennes du module de Young entre la plaque vierge et les plaques de 3 plis.....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 19 Tableau comparatif des valeurs moyennes de la contrainte maximale entre la plaque vierge et les plaques d'un pli</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 20 Tableau comparatif des valeurs moyennes de la contrainte maximale entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis.....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 21 comparatif des valeurs moyennes de la contrainte maximale entre la plaque vierge et les plaques de 3 plis.....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 22 Tableau comparatif des valeurs moyennes de la déformation entre la plaque vierge et les plaques d'un pli</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 23 Tableau comparatif des valeurs moyennes de la déformation entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis.....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau 24 Tableau comparatif des valeurs moyennes de la déformation entre la plaque vierge et les plaques de 3 plis.....</i>	<i>65</i>
<i>Tableau 25 Tableau comparatif des valeurs moyennes de densité entre la plaque vierge et les plaques de 1 pli</i>	<i>69</i>
<i>Tableau 26 Tableau comparatif des valeurs moyennes de densité entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis.....</i>	<i>70</i>

Liste des abréviations :

ABS : acrylonitrile butadiène styrène
C : concentration
CMC : composite à matrice céramique
CVM : monomère chlorure de vinyle
E : module de Young
HDPE : polyéthylène haute densité
m : masse
MMC : composite à matrice métallique
PET : polyéthylène téréphtalate
PLA : acide polylactique
PMC : composite à matrice polymère
PP : polypropylène
PS : polystyrène
PSN1 : composite polystyrène renforcé au NaOH 1 pli
PSN2 : composite polystyrène renforcé au NaOH 2 plis
PSN3 : composite polystyrène renforcé au NaOH 3 plis
PSK1 : composite polystyrène renforcé au KMnO₄ 1 pli
PSK2 : composite polystyrène renforcé au KMnO₄ 2 plis
PSK3 : composite polystyrène renforcé au KMnO₄ 3 pli
TDF : taux de fibres
T_f : température de fusion
T_g : température de gel
V : volume

Liste des symboles :

ρ : Densité

σ : Contrainte

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction Générale

Les fibres naturelles végétales sont présentes dans quasi la totalité de la surface terrestre et ceci sous différentes formes. À titre d'exemples, nous citons : des champs de végétations naturelles ou sauvages, des marais, ou des champs agricoles spécifiquement dédiés à l'exploitation.

Jusqu'à la moitié du siècle passé, les fibres naturelles eurent différentes applications vis-à-vis de différentes industries, cependant l'avancement de la recherche concernant les polymères synthétiques, étant donné principalement son bas coût de production, à rapidement devancés le secteur de production à partir d'origines naturelles.

Toutefois, au cours des siècles derniers, les mêmes pays qui initièrent la première et la seconde révolution industrielle, sont ceux étant qui dirigent la troisième avec l'éco-responsabilité comme valeur ajoutée à cette œuvre. Cette révolution se caractérise principalement par un développement notable de matériaux qui permettent de générer un cercle véritablement durable et respectueux de l'environnement sans pour autant abandonner ou négliger les exigences technologiques de notre ère actuelle.

Tout au long de l'histoire de l'humanité les fibres naturelles ont joué un rôle important du secteur de construction. En effet, certaines données recueillies nous informent de l'utilisation de fibres issues de feuilles et de bois pour servir de renforcement au blocs fabriqués principalement d'argiles afin de construire habitations et demeures , voir même dans l'optique de parvenir à supporter le poids de charges modérées.

Plusieurs études sont réalisées à travers le monde, unissant les efforts de la communauté scientifique dans l'espoir de mettre au point des matériaux composites complètement biodégradables , pour pouvoir ainsi mitiger et diminuer les risques de la production croissante des produits d'origine synthétique sur le monde , ayant déjà commencé à apparaître depuis la seconde moitié du siècle précédent.

C'est bien dû à ces facteurs ci que les scientifiques s'orientent avec un dévouement croissant à la thématiques de développement matériaux bio composites écoresponsables prenant pleinement conscience des dangers imminent qui menacent notre environnement si rien n'est mené à terme pour changer la situation

Introduction Générale

Les chercheurs portent beaucoup d'intérêt pour les composites à renfort végétal, ceci est due à la variété et à la multiplicité de leurs caractéristiques telles que la biodégradabilité, la faible densité, la non-toxicité, le faible coût et la recyclabilité [1]

Actuellement, les composites à matrice polymère renforcés de fibres synthétiques ont acquis une importance significative dans de nombreux domaines en raison de leur excellentes propriétés. Cependant, l'utilisation de polymères synthétiques est de plus en plus considérée de manière plus critique puisque son élimination après son utilisation suppose un grave problème environnemental. En raison de la demande croissante d'utilisation de des matériaux plus respectueux de l'environnement et avec l'objectif industriel de réduire le coût des fibres traditionnellement utilisées comme renfort de matériaux composites, l'utilisation de fibres naturelles a pris de l'importance au cours des dernières années. En ce sens, l'un des axes de recherche importants est la fabrication de nouveaux matériaux composites biodégradables comme alternative aux polymères traditionnels.[2]

D'une manière générale, la valeur du marché de ces composites connaît un taux de croissance annuel prévu de 7,6 % entre 2020 et 2027.

Cette croissance est due à la création de la bio économie qui a poussé le besoin de leur développement encore plus loin dans le but de créer des innovations respectueuses de l'environnement basées sur des sources renouvelables et des produits recyclables.[3]

Plusieurs recherches ont été mises au point montrant la possibilité d'adopter "des polymères biodégradable et biosourcés", tel que l'acide polylactique (PLA) issu de l'amidon, ou issus de ressources fossiles telles que le polyprolactone (PCL).

Pour plusieurs applications, les polymères sont renforcés par des fibres synthétiques. Les plus utilisées sont les fibres de verre pour leur disponibilité et leur faible cout. Cependant, en raison de leur impacts négatifs, les chercheurs ont adopté la même approche de substituer ce type de renfort par un autre naturel et écologique tels que les fibres de bambou, d'alfa, de coton,...

Or, l'adhésion entre la matrice et la fibre est un problème souvent rencontré dans l'élaboration des matériaux composites du fait que la matrice a tendance à être hydrophobe et que les fibres naturelles soient hydrophiles par cause de la présence de composés hydrophiles tels que la cellulose et l'hémicellulose.[4]

Les bio composites sont des étant des matériaux issus de sources renouvelables et/ou avec processus d'élimination biodégradable qui peut remplacer l'utilisation de polymères

Introduction Générale

synthétiques-artificiels, ou d'autres matériaux, toxiques pour l'homme et/ou polluant l'environnement. Cette étude prétend à d'obtenir des produits pouvant être exploités avec un processus de production concrets et rationnel, c'est-à-dire qui minimise la contribution des matières et énergie lors des phases de production, qui sont biocompatibles toutes les étapes de la vie et qui incluent un processus d'élimination en circuit fermé à afin de limiter l'impact sur l'écosystème.[5]

Au cours de cette présente étude nous nous focaliserons sur la réalisation de matériaux composites renforcés par la fibre végétale de Luffa (ou Loofah) compte tenu de sa facilité d'obtention et son caractère commun dans le territoire national afin de pour exploiter ses caractéristiques et morphologie pour aboutir à un matériau fiable, respectueux de l'environnement et économiquement favorable.

Au cours du chapitre 1 les points suivant sont abordés : Etat de l'art sur l'objet de l'étude citant les matériaux composites, leurs structures, leurs spécificités, leurs avantages et leurs principaux domaines d'applications. Aussi il apporte une description sur la place qu'occupe la source végétale en tant qu'apport dans le domaine d'ingénierie actuelle ainsi que leurs propriétés et leurs caractéristiques, ensuite sont cités quelques méthodes communément appliquées lors de la fabrication de matériaux composites.

À continuation, le second chapitre dans lequel vient décrit le matériel usité dans cette étude, la fibre de Luffa ainsi que le matériel exploité autant que renfort pour le composite : le polystyrène Crystal, ses caractéristiques, propriétés et certains de ses impacts et valeur dans l'environnement. En outre, le procédé de fabrication des plaques de matériaux composites de même que les techniques de caractérisations y sont abordées.

Enfin le chapitre 3 ce dernier porte sur l'exposition et le traitement des résultats obtenus suites à l'expérimentation et leurs interprétations, aboutissant à la fin à une conclusion générale sur l'étude menée.

Chapitre I: Etude Bibliographique

Chapitre I: Etude Bibliographique

1.1 Définition d'un composite

Un matériau composite est défini comme une combinaison de deux ou plusieurs micros ou macros constituantes, qui diffèrent par leur forme et leur composition chimique, insolubles les uns dans les autres (figure 1). Typiquement, l'un des constituants est appelé une matrice tandis que les autres constituent les inclusions. Caractéristiques communes à presque tous les matériaux composites ont une plus grande résistance et rigidité que les matrices de base et des valeurs de densité plutôt faibles. De plus, en choisissant les constituants, il est possible de concevoir les propriétés à obtenir puis de concevoir les matériaux en fonction des spécifications fonctionnelles et structurelles à créer.[5]

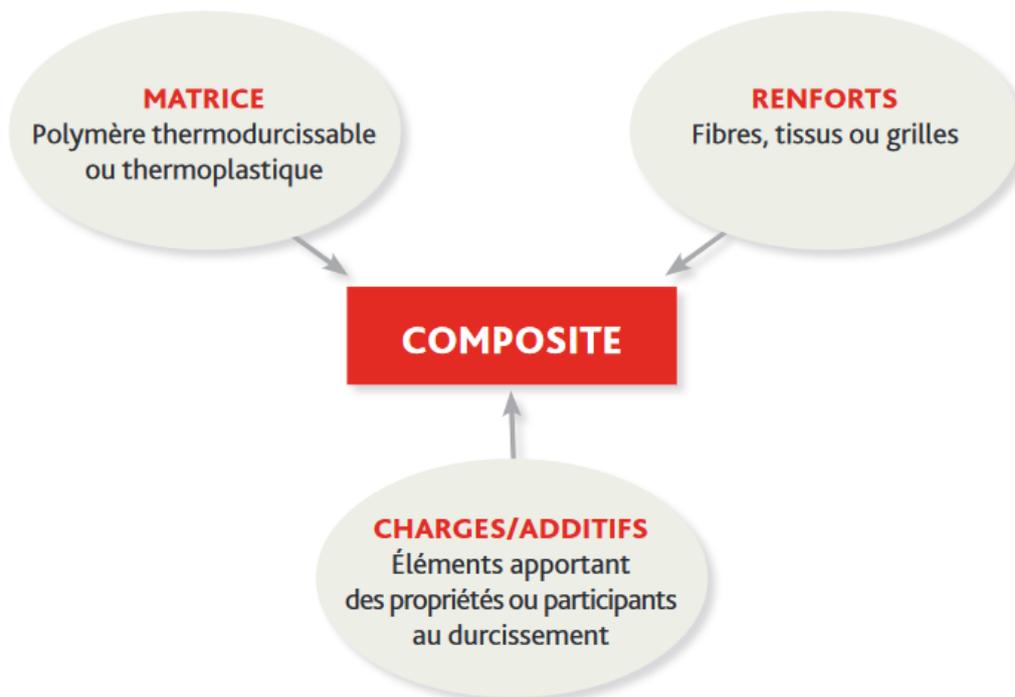


Figure 1 Eléments constitutifs d'un composite

Ainsi, un matériau composite est un système composé d'un mélange ou combinaison de deux ou plusieurs micro ou macro constituants qui diffèrent par la forme et composition chimique et qui sont essentiellement insolubles les uns avec les autres (Figure 2). C'est important mettre en évidence les différences d'échelle concernant la nanostructure ($10^{-2} \mu\text{m} - 108 \mu\text{m}$), microstructure ($10^{-7} \mu\text{m} - 10^{-4} \mu\text{m}$) et macrostructure ($>10^{-3} \mu\text{m} - 10^3 \mu\text{m}$).

Chapitre I: Etude Bibliographique

La plupart des matériaux composites sont constitués de deux phases ou plus, une matrice qui entoure les autres phases appelées phases dispersées et qui sont classés selon leur microstructure ou leur géométrie.

La microstructure de la phase dispersée comprend la forme, la taille, la distribution et l'orientation des particules. Il est important de noter que lorsque les proportions des composants sont exprimées (constituants matriciels et dispersés), il faut bien distinguer les relations dans masse (% m/m) ou en volume (% v/v) puisque la densité (g/cm³) de chacun de ces phases peuvent être très différentes.[2]

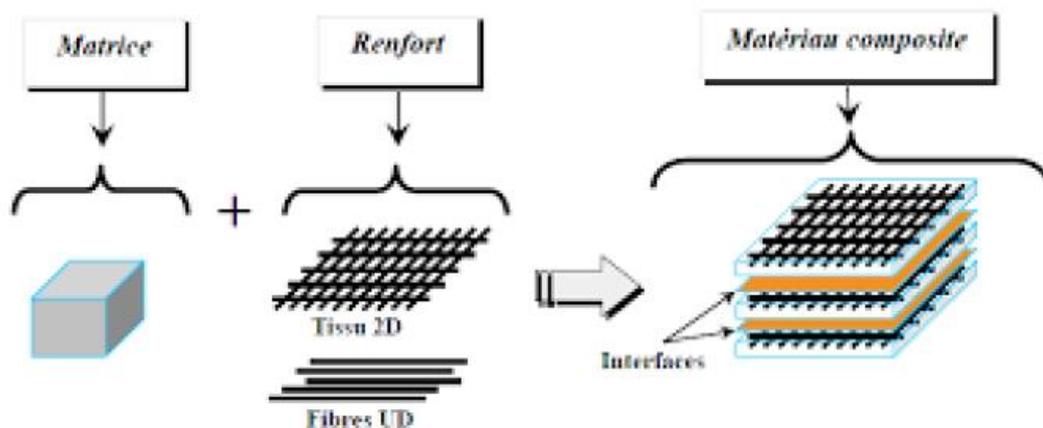


Figure 2 Schéma de la structuration d'un matériau composite[5]

Par conséquent, les concentrations de matière fibreuse dispersée dans une matrice à 50 % v/v peut équivaloir à une concentration très différente en % m/. Sur la base des critères de la nature de la microstructure de la phase dispersée, pour la classification des matériaux composites trois groupes peuvent être établis (Figure 3) :

- Composites renforcés de particules.
- Composites renforcés de fibres.
- Composés structuraux.[2]

Chapitre I: Etude Bibliographique

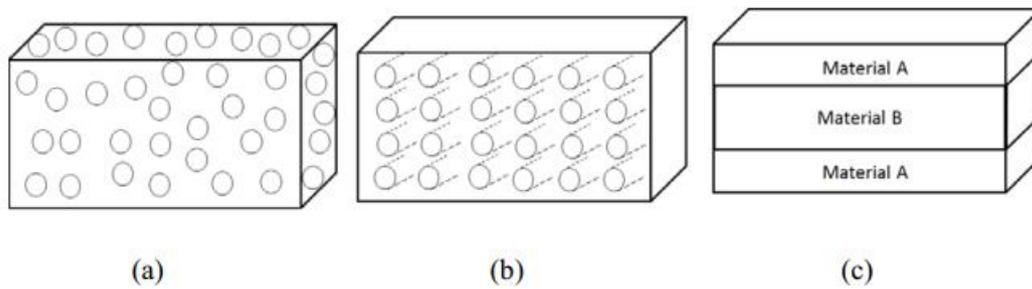


Figure 3 Types de matériaux composites. (a) avec particules, (b) avec fibres, (c) laminaire

1.2 Avantages et Inconvénients majeurs des composites

Le tableau ci-dessous donne quelques avantages et inconvénients des matériaux composites [5]

Tableau 1 avantages et inconvénients des composites

Principaux avantages	Principaux inconvénients
Gain de masse	Sensibilité au vieillissement (eau, UV...)
Absence de corrosion	Souplesse / acier
Intégration de fonctions (formes géométriques)	Tenu thermique / comportement au feu
Tenue aux agents chimique	Prix de la matière / acier

1.3 Types de composites

Les composites se distinguent selon la matrice :

- Les composites à matrice polymère, PMC (Polymer-Matrix Composite) : Par exemple thermoplastiques, comme le Nylon et l'ABS, ou thermodurcissables, comme les résines époxy. Ces matériaux ont des propriétés mécaniques spécifiques élevées.

Ce sont les composites les plus populaires et ont été développés pour améliorer la résistance mécanique des polymères, même lorsque la température augmente, en maintenant les qualités de légèreté.

- Composites à matrice métallique, MMC (Metallic-Matrix Composite) : Généralement aluminium, ou titane et leurs alliages, plus rarement magnésium ou autres. Ces matériaux offrent une meilleure résistance aux hautes températures ;

Chapitre I: Etude Bibliographique

• Composites à matrice céramique, CMC (Ceramic-Matrix Composite) : Généralement carbure de silicium ou alumine. C'est matériaux ont été étudiés afin d'améliorer la ténacité de la matrice sans détériorer sa résistance et sa densité. Les matrices céramiques comprennent également des matrices vitreuses et vitrocéramiques.

Il existe également des composites carbone-carbone, c'est-à-dire dans lesquels la matrice et le renfort est constitué de carbone et de composites hybrides c'est à dire contenant deux ou plusieurs types de fibres.[5]

1.4 La matrice

Un matériau composite est le résultat de l'association d'une matrice, d'un élément renforçant et de distincts additifs et adjuvants.

On appelle généralement la matrice, un liant polymérique qui, associé à un renfort, permet de le maintenir dans ses formes en assurant la cohésion de l'ensemble et le transfert des efforts. C'est elle qui apporte les propriétés physico-chimiques du produit final.

Ces polymères présentent les avantages suivants :

- Faible densité ;
- Faible coût ;
- Bonnes propriétés mécaniques ;
- Bonne résistance thermique ;
- Bonne résistance aux solvants et à l'humidité ;
- Bonne adhésion aux fibres ;
- Bonne résistance au feu et à l'émission des gaz toxiques [6]

Les matrices peuvent être de différentes sortes (Figure 4) permettant ainsi de différencier plusieurs types de composites et notamment :

- Les composites à matrice thermoplastique,
- Les composites à matrice thermodurcissable,
- Les composites à matrice élastomère,
- Les composites à matrice et renfort métalliques,
- Les bio-composites.

Chapitre I: Etude Bibliographique

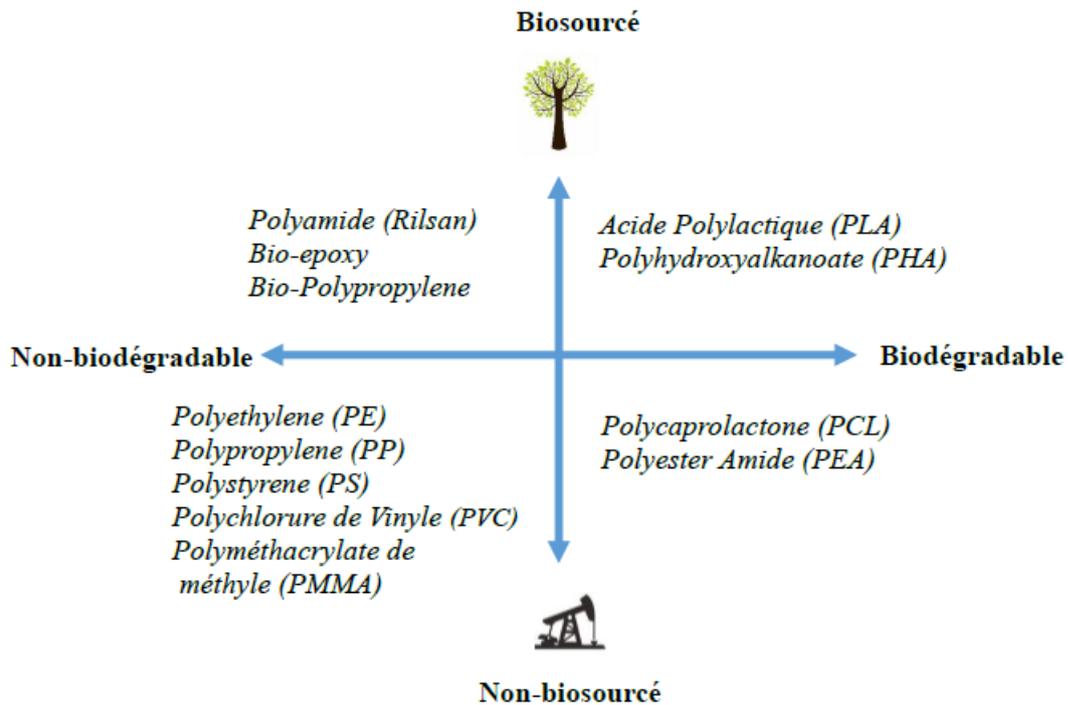


Figure 4 Catégories des différentes sortes de polymères.

Les composites à matrice organique, regroupent les composites à matrice thermoplastique, thermodurcissable et élastomère.

1.4.1 Les composites à matrice thermoplastique TP

Les matrices polymères thermoplastiques peuvent se présenter sous différentes formes :

- Granulés
- Filament,
- Poudre,
- Plaque.

De densité relativement faible, elles se ramollissent sous l'effet de la chaleur et deviennent malléables à chaud (Tableau 1). Lors du refroidissement, le polymère durcit et se fige permettant ainsi au renfort de conserver sa forme. Cette transformation est totalement réversible et ne génère aucune chaleur intrinsèque.

Dans l'automobile, ces matrices sont généralement associées à différents types de fibres telles que la fibre de verre, la fibre de carbone ou encore les fibres végétales comme le lin ou le sisal.

Chapitre I: Etude Bibliographique

Tableau 2 Propriétés des thermoplastiques[4]

Polymère	Tg (°C)	Tf (°C)	Densité ρ (g/cm ³)	σ_r (MPa)	E (GPa)
PP	5	165	0.92	30	1.2
PLA	50-60	150	**	40-60	3-4
HDPE	-100	134	0.95	28	1.1
PVC	75-105	160-220	1.39	58	2.9
PS	90-100	-	1.05	55	3.2
PET	70	255-265	1.30	47	2.6
ABS	90-120	-	1.05	50	2.5

1.4.2 Les composites à matrices thermodurcissables TD

Les matrices thermodurcissables peuvent se présenter sous deux formes :

- Liquide visqueux appelé résine,
- Poudre.

Elles ont la particularité de durcir par apport de chaleur lors d'une réaction chimique appelée polymérisation. Cette réaction est irréversible et dégage une grande quantité de chaleur. On dit qu'elle est exothermique. Les thermodurcissables ne se ramollissent pas sous l'effet de la chaleur et forment après polymérisation une structure chimique tridimensionnelle qui confère au produit final des propriétés physico-chimiques et mécaniques intéressantes (Tableau 2). Les composites réalisés à partir de ces matrices peuvent être renforcés avec toutes sortes de fibres mais les plus communes restent la fibre de verre, la fibre de carbone ou la fibre d'aramide. Les techniques de transformation des matériaux composites thermodurcissables sont nombreuses et font appel à un savoir-faire souvent artisanal. Néanmoins, les avancées technologiques dans les matériaux et les équipements ont permis de développer des procédés innovants permettant de répondre aux besoins des industriels pour des applications spécifiques. [9]

Chapitre I: Etude Bibliographique

Tableau 3 Propriétés des thermodurcissables [4]

Résine	Densité ρ (g/cm ³)	E (GPa)	σ_r (MPa)	Tg (°C)
Epoxyde	1.2	4.5	130	90-200
Uréthane	1.1	0.7-7	30	100
Polyester insaturé	1.2	4	80	60-200
Urée Formaldéhyde	1.2-1.5	6-10	40-80	140
Phénol Formaldéhyde	1.1-1.3	3-4	35-60	80-300

1.5 Les Elastomères

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Les élastomères sont caractérisés par leur grande déformabilité (6 à 8 fois leur longueur initiale), et sont obtenus à partir de polymères linéaires caractérisés par des liaisons extrêmement faibles. Ces polymères sont donc des liquides très visqueux. Pour être utilisées comme caoutchouc, des liaisons pontales (nœuds de réticulation) doivent être introduites entre les chaînes, conférant ainsi aux matériaux une structure tridimensionnelle qui assure la réversibilité de la déformation mécanique. Les nœuds de réticulation sont introduits par une réaction chimique appelée vulcanisation après la mise en forme du matériau.[9]

La différence principale entre les élastomères et les thermoplastiques repose sur la température de transition vitreuse. Les élastomères ont généralement une température de transition vitreuse supérieure à celle de la température ambiante, les rendant mou et souple.

Tandis que, la température de transition vitreuse des thermoplastiques est au-dessous de la température ambiante, les rendant dur et cassant. [4]

Chapitre I: Etude Bibliographique

1.6 Comparaison des matrices

Les tableaux 3 et 4 regroupent certaines des principales différences entre les différents types de matrice :

Tableau 4 Comparaison caractéristiques des principales matrices polymères [4]

Matrices thermodurcies	Matrices thermoplastiques
<ul style="list-style-type: none"> • Amorphes • Résistants aux températures élevées • Viscosité basse pendant la mise forme • Fragiles • Cycles de fabrication longs • Difficiles à réparer. • Recyclage de déchets impossible 	<ul style="list-style-type: none"> • Amorphes ou semi cristallines • Haute résistance à l'impact. • Fabrication difficile en raison de la viscosité très élevée du polymère fondu • Thermo formable • Possibilités de réparation • Recyclage très aisé

Tableau 5 Comparaison caractéristiques physico-chimique des principales matrices polymères [5]

Matrice	Résine	Tf(°C)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$\sigma_f^K(\text{MPa})$	E(GPa)
TP	Polypropylène	900	1.2	20-35	1.1-1.4
	Polyamides	65-100	1.14	60-85	1.2-2.5
TD	Epoxydes	290	1.1-1.5	60-80	3-5
	Phénoliques	120	1.20	40	3-5
	Polyesters	60-100	1.14	50-85	2.8-3.6

1.7 Le renfort

Les matériaux composites peuvent offrir à la fois une excellente rigidité et une bonne propriété d'amortissement. La rigidité est la capacité d'un matériau à s'opposer à des déformations lorsqu'il est soumis à des sollicitations mécaniques. Elle est assurée principalement par le renfort qui a pour rôle de supporter l'essentiel de l'effort mécanique appliqué au matériau composite grâce à ses caractéristiques mécaniques élevées (modules d'Young, limite d'élasticité, résistance mécanique, ...etc.) [10]

Le schéma (Figure 5) suivant donne une classification générale des différents types de renforts.

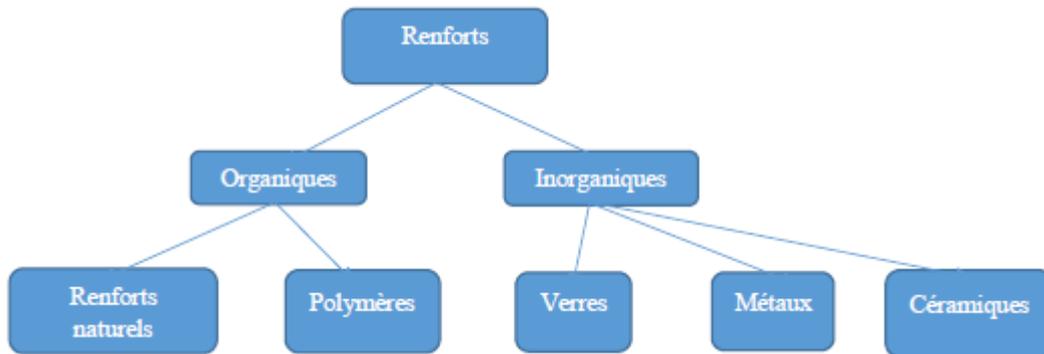


Figure 5 Schéma des renforts existants[5]

Selon la forme du renfort, nous distinguons deux classes de composites que sont les composites à *fibres* et les composites à *particules*. L'une ou l'autre des deux classes est choisie en fonction des caractéristiques voulues. En ce qui concerne les composites à fibres, nous avons des fibres longues et des fibres courtes. Les fibres courtes font entre 100 μm et 1 mm de long alors que les longues sont au-delà de 1 mm. Les fibres assurent aux composites leurs propriétés mécaniques. Les particules, contrairement aux fibres, n'ont pas de dimension spécifique. Elles sont souvent non seulement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices entre autres la rigidité et la tenue à la température mais aussi utilisées comme charges pour rendre le matériau économiquement plus intéressant sans toutefois réduire ses propriétés.[12]

Influence des caractéristiques du polymère Les caractéristiques du polymère vont gouverner diverses propriétés du composite. Peuvent être citées de façon non-exhaustive l'opacité du polymère, sa rigidité mécanique, sa résilience, sa masse volumique, sa résistance chimique, ses propriétés électriques, sa stabilité dimensionnelle ou encore sa température de ramollissement [13]

Influence des propriétés du renfort fibreux Les caractéristiques morphologiques, les propriétés mécaniques et les propriétés de surface du renfort fibreux sont autant de leviers qui permettent chacun d'optimiser la formulation du composite.[13]

Chapitre I: Etude Bibliographique

1.8 Applications des bio composites

On appelle éco composite les matériaux composites éco-conçus. Ces nouveaux matériaux désignent tous les produits ayant fait l'objet d'une conception dans le respect des problématiques liées à l'environnement et au développement durable. Ce qui implique, selon l'ADEME, entre autres de recourir « aussi peu que possible aux ressources non renouvelables en leur préférant l'utilisation de ressources renouvelables, exploitées en respectant leur taux de renouvellement et associé à une valorisation des déchets qui favorise leur réemploi, leur récupération et leur recyclage ». Ainsi, la conception écologique d'une structure prendra en considération les aspects environnementaux (impact carbone, recyclabilité, etc...), ainsi que les aspects économiques (coûts de production) et sociaux (gestion de main-d'œuvre et des ressources locales, etc...). Aussi, l'écoconception implique généralement le recyclage des déchets en fin de cycle de vie. Cette définition s'inscrit ainsi dans un contexte lié à une économie circulaire

Du fait de leurs propriétés intéressantes par rapport aux matériaux traditionnels, les matériaux composites connaissent depuis plusieurs années un développement exceptionnel dans des secteurs industriels très variés et entrent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines d'applications possibles.[10]

Parmi ces domaines :

Les structures aéronautiques : Aujourd'hui les avions sont plus puissants, plus rapides, plus grands, et plus nombreux ce qui entraîne une consommation énorme de carburant et donc un rejet dangereux de gaz polluant. Pour cela les ingénieurs et les scientifiques des matériaux cherchent des solutions pour réduire au maximum cette consommation. Parmi les solutions, l'utilisation des matériaux composites dans la structure d'avion pour diminuer leur poids puisqu'à distance égale, un avion moins lourd va consommer moins de carburants. Par exemple, la structure globale de l'Euro fighter Typhoon est composée de 40% de matériaux composites à base de fibres de carbone. Ainsi que dans la Boeing B787 et dans l'Airbus A350-XWB le pourcentage de ce type de matériaux atteint respectivement 50% et 52%[10].

Dans l'industrie automobile Pour répondre aux exigences de performance et de consommation de carburant, l'utilisation de composites dans l'industrie automobile est en croissance.[10]

Les pales des éoliennes sont généralement constituées de composites pour améliorer l'efficacité de la récupération d'énergie électrique.[10]

De plus en plus, l'industrie automobile impose l'utilisation des matériaux dits verts pour répondre aux objectifs de réduction de poids, de diminution de consommation d'énergie et

Chapitre I: Etude Bibliographique

d'émission de CO₂ (Figure 6), tout en assurant la qualité et la sécurité des véhicules, des coûts de production réduits et la recyclabilité des matériaux. Selon la réglementation européenne, l'objectif est de réduire à 95 g/CO₂/km l'émission des gaz polluants pour 2020[14]

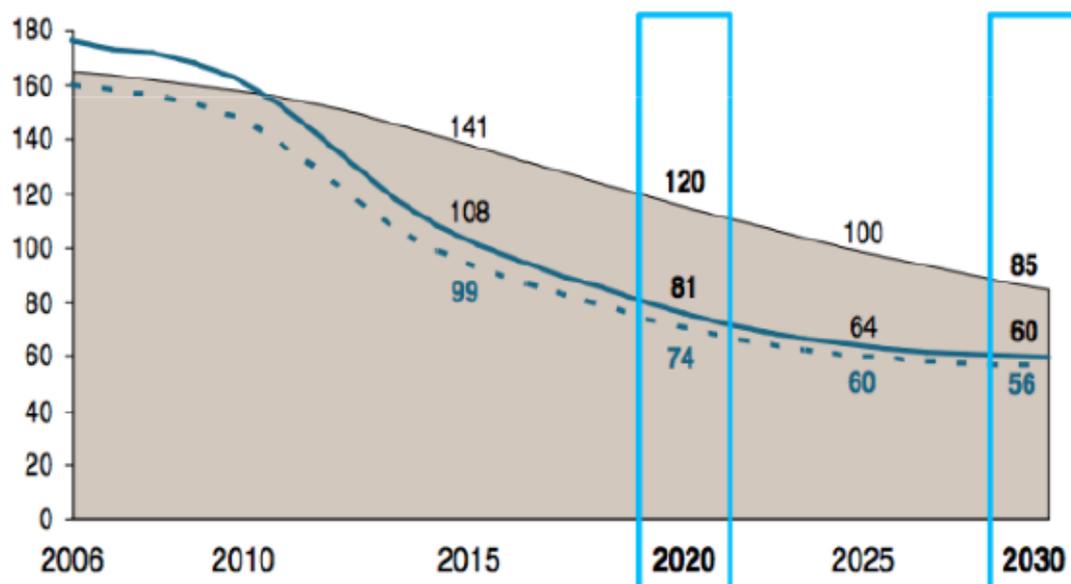


Figure 6 Evolution de l'émission des gaz polluants en fonction des années [Réseau Action Climat France, 2011]. [13]

Dans les navires ou les infrastructures : les matériaux composites ont une haute résistance à la corrosion. Ils sont par conséquent très employés dans ces domaines. Dans le domaine de nautisme, les matériaux composites se trouvent par exemple dans la coque, au pont en passant par les coffres, tables et autres cloisons. De plus, les pièces de frein et de moteur fonctionnant à haute température sont souvent fabriquées à partir de composites à matrice métallique ou céramique.

Domaines de sport et des loisirs : C'est l'un des principaux consommateurs de composites. Les matériaux composites offrent aux structures une bonne résistance mécanique et une longue durée de vie tout en gardant un poids réduit[14]

1.9 Généralités sur les propriétés biologiques de la cellule végétale

La paroi cellulaire des plantes est la plus grande source de biomasse sur Terre et est de grande importance pour l'alimentation humaine et animale tout en étant la source fibre primaire pour différents usages. Pour ces raisons les études de la biosynthèse de la paroi cellulaire des plantes a toujours été considérée soit comme de la recherche fondamentale, dédiée à comprendre l'importance des mécanismes biochimiques et physiologiques, soit de la

Chapitre I: Etude Bibliographique

recherche appliqué compte tenu de la large utilisation industrielle des matériaux qui composent le mur cellulaire.

La paroi cellulaire des plantes supérieures peut se diviser en paroi primaire et mur secondaire. La paroi cellulaire primaire est constituée d'une série de polysaccharides comme la cellulose, l'hémicellulose et les pectines. La paroi primaire des dicotylédones est constituée de un réseau de macromolécules de cellulose noyées dans une matrice polysaccharidique complexes, dont les xyloglucanes et les pectines sont les plus abondants[15]

Les fibres naturelles d'origine végétale sont des substances complexes, dans une combinaison hétérogène de polymères cellulosiques, de lignine et de pectine, elles sont obtenues à partir de plantes telles que : abaca, ananas, cabuya, coton, ceibo, paille de toquilla, banane, palmiers, osier, pita, totora, bambou..etc. Et autres introduits ou adaptés tels que : lin, caruhaua, kénaf, ramie, les fibres végétales sont composées de mycofibrilles complexes de polymères à longues chaînes. Les fibres animales sont des protéines telles que les cheveux, la laine et la soie. Le règne minéral est représenté par l'amiante. L'industrie a déterminé des processus industriels pour obtenir des fibres techniquement applicables à partir de la matière première. Il existe une relation étroite entre les conditions de traitement, la composition chimique et la longueur technique des fibres. La pénurie imminente de pétrole dans un avenir proche et la préoccupation environnementale croissante de la part de reconsidérer l'utilisation des agrofibrilles comme matériau de renforcement dans les matériaux composites en raison de leurs excellentes propriétés.[15]

La faiblesse de la masse volumique des fibres végétales (1.2 à 1.5 g/cm^3) confère à ces matériaux des propriétés mécaniques spécifiques intéressantes. Les fibres longues ont des contraintes en traction plus faibles que les fibres courtes, du fait que les premières ont de plus grandes probabilités de contenir des défauts de formation.

Lors d'un essai de traction sur une fibre végétale, les paramètres influençant sur la courbe contrainte/ déformation sont[16] :

- La nature de la fibre (composition et structure)
- La largeur de la fibre sollicitée (vrai aussi pour les fibres de verre)
- Les pourcentages d'eau absorbée dans la fibre. En effet, la variation du pourcentage d'eau absorbée entraîne une variation de la section de la fibre (retrait ou gonflement) ; l'eau pénètre dans les zones amorphes et modifie le transfert de charge entre les éléments fibrillaires.
- Le diamètre de la fibre qui n'est pas constant dans une même plante ; le module d'Young et la contrainte à la rupture évoluent avec les diamètres des fibres ; plus le diamètre est faible plus la rigidité et la résistance sont importantes.

Chapitre I: Etude Bibliographique

1.10 La Cellulose

La cellulose est un polymère linéaire de glucose lié par des liaisons β 1-4 entre résidus avec un degré de polymérisation pouvant varier de 6000 dans le mur primaire aux 14 000 résidus dans la paroi secondaire (Figure 7) Les chaînes polymères sont liées en formant des micro fibrilles d'environ 3 nm de diamètre dans la paroi primaire et de 5 à 10 nm dans la secondaire (Jarvis 2003, Brown 1996); chaque micro fibrille est constituée de 36 chaînes polysaccharides (Fig. 1.14) qui sont liés à la fois par des liaisons intra et hydrogène forces intermoléculaires et de Van der Waals (French et al., 1999, French et al., 1993).

Environ 180 milliards de tonnes de cellulose sont produites sur terre chaque année, de ce fait c'est le polymère le plus abondant sur la planète (Englehardt 1995).[15]

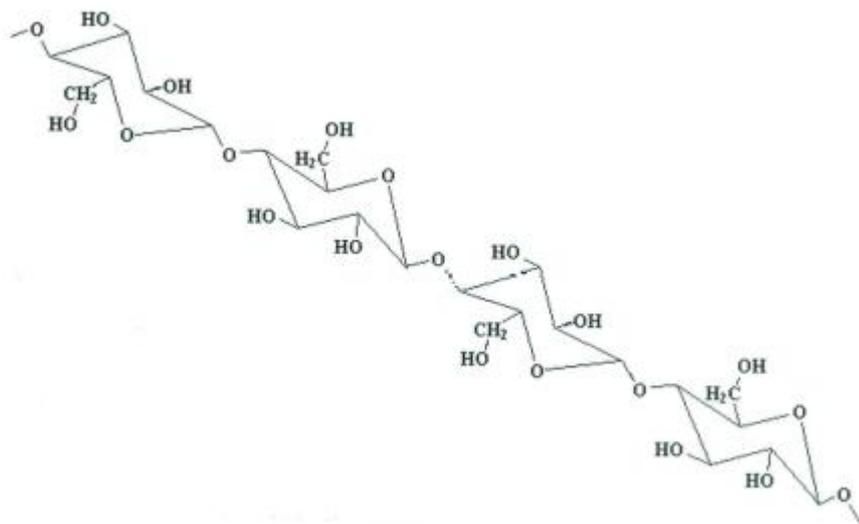


Figure 7 La chaîne de cellulose Formule brute: $[C_6H_{10}O_5]_n$ [15]

1.11 Avantage et inconvénients des fibres végétales

Avantages

- Ils sont respectueux de l'environnement à la fois dans le processus, la production et l'élimination en fin de cycle.
- Ils sont renouvelables et nécessitent moins d'énergie d'entrée par unité de production. Propriétés similaires à celles des matériaux avec renforts en fibre de verre.
- Meilleure élasticité Ils sont moins abrasifs pendant le processus de fabrication Ils absorbent bien les vibrations et donc le son.
- 2 à 3 fois moins cher que de travailler avec de la fibre de verre. Si un composé 100% biodégradable est requis, ils peuvent être mélangés avec des bio-polymères tels que l'amidon, la lignine, l'hermicellulose, le caoutchouc.[17]

Inconvénients

Chapitre I: Etude Bibliographique

- Lorsque les composés avec des fibres naturelles sont brûlés, il y a moins de production de CO₂ et d'autres gaz toxiques.
- La qualité des fibres dépend des conditions naturelles.
- De grandes zones de culture sont nécessaires si la production à grande échelle est lancée. La faible densité devient un inconvénient au cours du processus.
- La liaison entre les polymères et les fibres naturelles est faible.[17]

1.12 Quelques procédés d'élaboration

1.12.1 Moulage sous vide

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. (Figure 8) Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et débulle la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité.

Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyenne des séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre-moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes. [4]

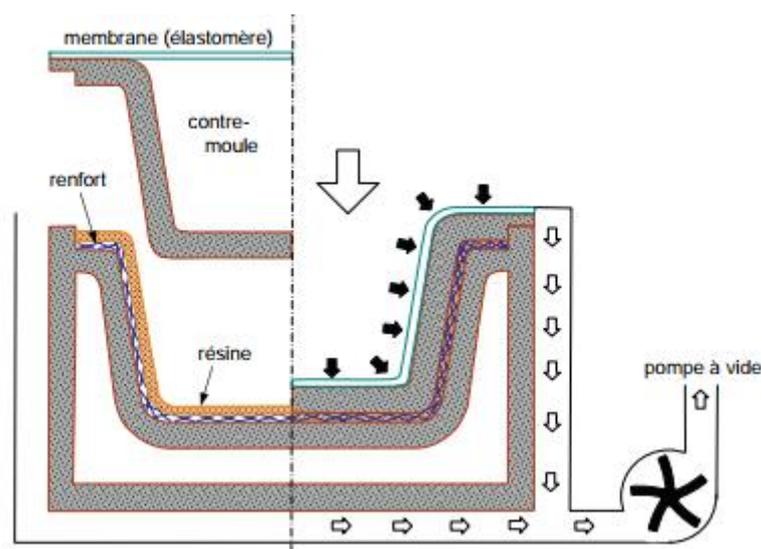


Figure 8 Mécanismes du moulage sous vide[4]

Chapitre I: Etude Bibliographique

1.12.2 Moulage par centrifugation

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. Elle est une extrapolation de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé.

Le moule de révolution, enduit d'agent de démoulage, est mis en rotation (à environ 2 000 tours/min). Après dépôt éventuel de gel coat, on introduit simultanément en continue.

La résine catalysée et accélérée (résines époxydes, polyesters, etc.) durcissant à froid. L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée sous l'effet de la centrifugation. La stratification s'effectue par passages successifs de la buse d'alimentation en résine et renfort. La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve.

Un renfort sous forme de rouleau (mat, tissu, etc.) peut être introduit éventuellement en discontinu avant rotation du moule. La résine est introduite ensuite lors de la centrifugation

Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permettant le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés. Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision et un très bon équilibrage du moule (Figure 9).

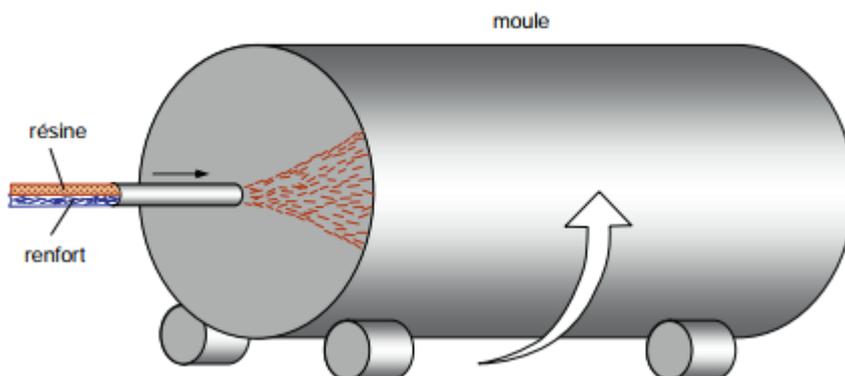


Figure 9 Mécanismes du moulage par centrifugation[4]

Chapitre I: Etude Bibliographique

1.12.3 La thermocompression

La thermocompression (compression à chaud) consiste à appliquer un cycle temps-température-pression à un composite à l'aide d'une presse à plateau chauffants (figure 10)[18] La technique de moulage par thermocompression s'effectue par compression des matériaux entre deux plaques chaudes à des pressions pouvant atteindre 300 bars, permettant ainsi la mise en œuvre de pièces relativement épaisses. Ce procédé est le moins énergivore parmi les procédés de mise en œuvre des composites à fibres longues et à résine thermoplastique. De plus, c'est une technique qui, hormis la pression ou la température, n'impose aucune autres sollicitations (cisaillement, flexion...) au composite. Enfin, c'est un procédé qui peut permettre de fabriquer des pièces à une cadence relativement élevée. C'est donc le procédé qui sera utilisé dans la thèse.

Les composites fabriqués par thermocompression sont soumis à trois paramètres qui sont : la pression, le temps de maintien ainsi que la température. Dans la littérature, de nombreuses études s'intéressent à l'influence de ces paramètres sur la qualité du composite produit.[14]

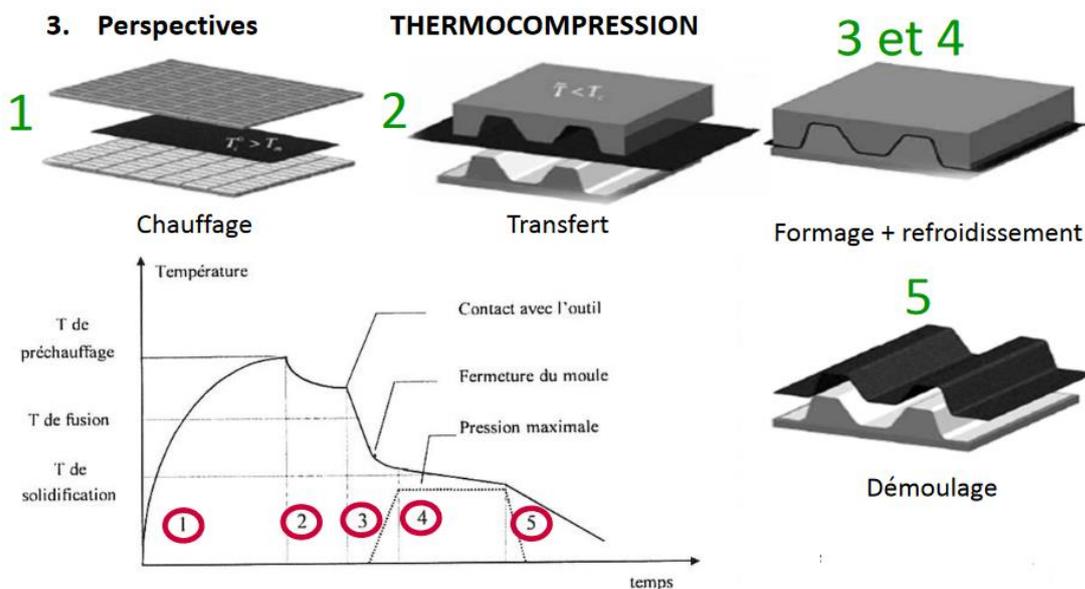


Figure 10 Schéma récapitulatif du procédé de thermocompression [8]

Chapitre II : Matériels & Méthodes

Chapitre II : Matériels & Méthodes

2.1 La fibre de Luffa

Au cours des dernières années, il y a eu une augmentation de préoccupations envers l'environnement, une plus grande attention est accordée à l'utilisation de fibres végétales profitant de leur abondance et disponibilité en tant que ressource renouvelable et leur biodégradabilité dans l'environnement et économiques pour leur rentabilité.

En conséquence, un certain nombre d'articles de synthèse ont été publiés sur les composites fibres végétales-polymères dont biodégradables composites. Cependant, l'utilisation de fibres végétales comme renforts dans les matériaux composites nécessite une attention particulière concernant la fibre / adhérence à la matrice, en particulier lorsque la matrice est hydrophobe en nature. Ceci est une conséquence du fait que fortement polarisé les fibres de cellulose (hydrophiles) sont intrinsèquement incompatibles avec polymères hydrophobes. La principale théorie des liaisons chimiques seule n'est pas suffisante pour élucider le problème complexe de l'adhérence dans matériaux composites et considérations sur les réactions acido-basiques à l'interface. En effet, la morphologie de l'interface et l'énergie de surface et les caractéristiques de mouillage font partie des phénomènes d'interface. Plusieurs auteurs ont étudié l'adhérence de la matrice de fibres dans les composites fibres naturelles-polyester, notamment Fibres de luffa à travers différents types de traitements de surface.[19]

Le luffa ou loofah fait partie de la famille cucurbitacée, nommé également éponge végétale, est un fruit tropical vert allongé, consommable à l'état jeune, prenant par la suite une consistance fibreuse qui sert à la fabrication d'éponges (comme les éponges de douche).[20]

Dans les pays tropicaux, y compris les Philippines, les plantes fibreuses sont disponibles en abondance et au moins certaines d'entre elles sont des cultures agricoles. Parmi ceux-ci se trouve le luffa(ou Loofah) que l'on peut voir sous différents plans de coupe dans les figures (Figure 11) et (Figure 12), communément appelé « Patola » aux Philippines. C'est l'un des ingrédients préférés dans la préparation des plats indigènes en raison de son arôme appétissant. Il existe deux variétés de luffa disponibles aux Philippines. Il s'agit de la variété cylindrique ou « patolang kastila » (L. cylindrique) et de la variété angulaire (L. acutangula), originaire des Philippines. Lorsque le fruit arrive à maturité, il contient un corps fibreux squelettique poreux. Cette fibre présente dans les fruits mûrs sert de brosse ou d'éponge pour le nettoyage. De nos jours, il est couramment utilisé comme gommage corporel. Il est également utilisé pour les filtres dans les réservoirs d'alimentation des navires et la fibre bouclée rigide est utilisée pour la fabrication de chapeaux. Les éponges varient en taille de 8 à

Chapitre II: Matériels & Méthodes

24 pouces de long. Les plantes poussent rapidement donnant quatre récoltes annuelles et les graines peuvent produire 30 éponges.[21]

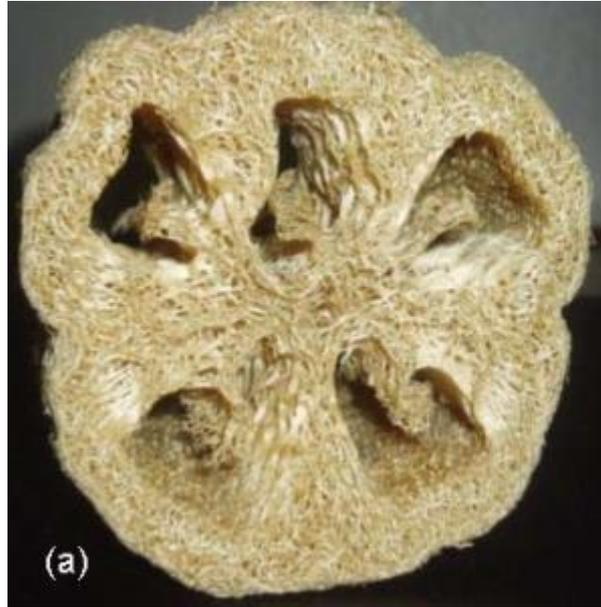


Figure 11 Coupe transversale d'une feuille de Luffa[22]



Figure 12 Coupe longitudinale d'une feuille de Luffa[22]

C'est une fibre naturelle qui a retenu l'attention des chercheurs, en raison de ses propriétés physico-chimiques (Tableau 5). Les fibres de luffa sont composées principalement de cellulose (54,2%) et de lignine (15,1%), son fruit possède un système vasculaire fibreux de

Chapitre II: Matériels & Méthodes

tailles comprises entre 15 cm et 1,5 m, et avec une moyenne de diamètre 8 à 10 cm (Figure13). Il est abondant en Chine, au Japon et dans d'autres pays d'Asie, d'Amérique centrale et du Sud. La structure du système vasculaire fibreux des éponges sèches peut être divisée en deux régions très différentes. Un noyau central avec une structure en nid d'abeille et des parties externes dans lesquelles les fibres sont disposées dans une matrice multidirectionnelle formant un tapis naturel. [22]

Les fruits de *Luffa cylindrica* (l'exemple le plus connu) ont un système vasculaire fibreux (éponge de Luffa). Les contrefiches de cette éponge naturelle sont caractérisées par une structure micro-cellulaire avec des canaux micro-creux continus (macropores avec un diamètre de 10 à 20 μm) qui constituent les paquets vasculaires et rapportent un système hiérarchique multimodal de pore[20]

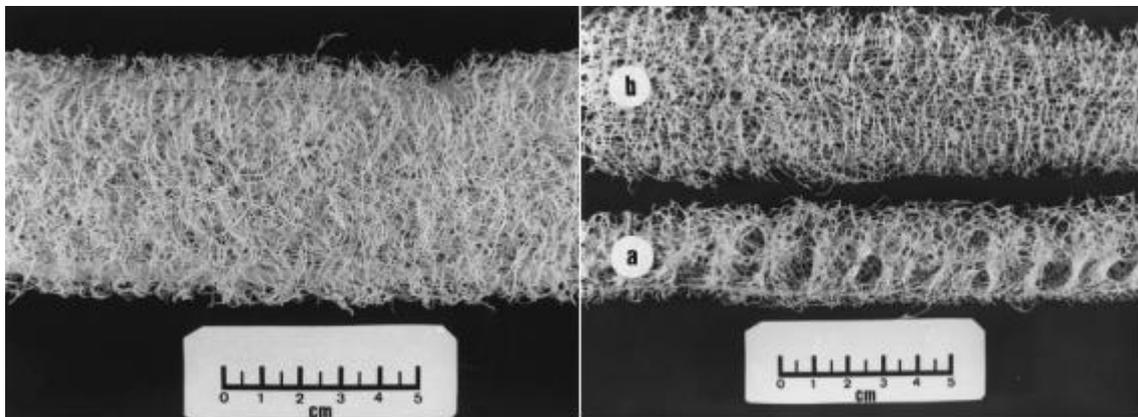


Figure 13 Imagerie optique de la structure morphologique de la fibre de Luffa[22]

Tableau 6 Propriétés physico-chimique de la fibre de Luffa[23]

Propriétés physique				Propriétés chimique			
Densité (g/cm^3)	Diamètre (μm)	Aspect ration	Angle Microfibrille ($^\circ$)	Cellulose (%)	Lignin (%)	Hemi Cellulose (%)	Cendres (%)
0.56- 0.92	270 ± 20	340 ± 5	12 ± 2	63.0 ± 2.5	11.69 ± 1.2	$20.88 \pm 1.$ 4	0.4 ± 0.1 0

2.2 Polystyrène

2.2.1 Définition

Le polyester est une classe de polymères contenant un groupe fonctionnel ester sur la chaîne principale polymère. Le terme polyester est généralement utilisé pour le polyéthylène téréphtalate (PET), malgré la présence de nombreuses formes de polyester, ses domaines applications sont aussi très variés textiles, automobiles, médicales, électroniques et de construction, suscitent un intérêt mondial. Le polyester est également largement utilisé

Chapitre II: Matériels & Méthodes

comme matériau d'emballage, comme les bouteilles/récipients. La polymérisation du polyester pourrait être réalisée sous forme de procédés de polycondensation, de polymérisation par ouverture de cycle et de polyaddition. De plus, le polyester pourrait être recyclé par des méthodes physiques (mécaniques) ou chimiques (réactions d'hydrolyse, de méthanolyse et de glycolyse). Le polyester recyclé pourrait être utilisé pour les emballages, les pièces de construction, les tuyaux, les réservoirs, les géotextiles, les non-tissés, les tapis, etc. On s'attend à ce que les réserves de pétrole brut soient épuisées au niveau mondial en 2043. Ainsi, le recyclage des polymères à base de pétrole est crucial. De plus, le recyclage efficace du polyester entraînera une diminution des émissions de dioxyde de carbone et donc du réchauffement climatique. Le polyester peut être classé en deux groupes : les polyesters thermoplastiques et les thermodurcissables (polyester insaturé, résine polyester) les polyesters. Les polymères thermoplastiques peuvent être classés en polyesters aromatiques linéaires (polyesters fibres et filmogènes), élastomères (copolyesters séquencés), polyester à cristaux liquides, plastiques techniques, polyesters aliphatiques et poly(hydroxyalcanoates)[23]

2.2.2 Catégories de polystyrène

Selon la structure chimique, le polyester peut être un thermoplastique ou thermodurcissable. Il existe également des résines polyester durcies par des durcisseurs ; cependant, les polyesters les plus courants sont les thermoplastiques. Les polyesters en tant que thermoplastiques peuvent changer de forme après l'application de chaleur. Bien qu'ils soient combustibles à des températures élevées, les polyesters ont tendance à se rétracter au contact des flammes et à s'éteindre automatiquement lors de l'inflammation. Le polyester en tant que fibres a une ténacité et un module E élevés ainsi qu'une faible absorption d'eau et un rétrécissement minimal par rapport aux autres fibres industrielles. Les fibres de polyester sont parfois filées avec des fibres naturelles pour produire un tissu aux propriétés mixtes. Les Polyester peuvent également être classés en polyesters saturés et insaturés.[24]

2.2.4 Les propriétés du polystyrène

Le polystyrène est devenu omniprésent dans vie quotidienne. Sa grande facilité de mise en œuvre, ses propriétés physico-chimiques particulières (Tableau 6) et son faible coût en font l'un des polymères les plus appréciés par les industriels dans les secteurs de l'emballage alimentaire, de l'électronique grand public, de l'électroménager et du bâtiment.

Comme l'ensemble des matières plastiques, le polystyrène possède de propriétés exceptionnelles :

Chapitre II: Matériels & Méthodes

- Physiques : transparence sous forme « cristal », brillance, grande, légèreté, possibilité de décoration et de collage.
- Mécanique : rigidité, bonne résistance aux chocs, sécabilité, facilité de mise en œuvre, possibilité d'obtenir des designs variés
- Chimique : le polystyrène est un polymère inerte et non toxique, il n'a aucun effet sur l'environnement puisque il est détruit avec les ordures ménagères sans dégagement de fumée toxique[25]

2.2.5 Application du polystyrène

Qu'il soit « cristal » ou « choc » le polystyrène répond à de nombreuses applications :

- Emballage (45% du marché du polystyrène) : conditionnement des produits laitiers et produits « frais », vaisselle à usage unique.
- Electronique grand public : structures de téléviseurs, cassettes, boîtiers de cassettes et disques compacts, de DVD, etc..
- Electroménager : façades de machines à laver, cuves et contre-portes de réfrigérateurs, aspirateurs, sèche-cheveux, etc.
- Bâtiment : plaques d'isolation, de luminaires et de profilés.
- Articles de maison : cintres, rasoirs, jouets, etc.
- Bureautique : photocopieurs, télécopieurs [25]

2.2.6 Polystyrène et Environnement

Les plastiques ne sont pas solubles dans l'eau et ne se dégradent que très lentement. Lorsqu'ils sont mis dans les décharges, ils apportent surtout une pollution « visuelle » en se dispersant au gré du vent. Ils peuvent être source d'énergie et de matière première.[25]

2.3 Matériels et des ressources utilisées

La fabrication de la presse thermique nécessaire pour mener à bien la réalisation des plaques de matériaux composites bio-sources à représenté la partie la plus chronophage et laborieuse de l'ensemble de la section expérimentale.

Cette fabrication s'est menée selon les étapes ci-dessous :

1. Conception et modélisation : faite dans le laboratoire du Fablab au sein de l'école national polytechnique d'Alger, ceci en ayant recours au logiciel de conception SolidWorks

Chapitre II: Matériels & Méthodes

2. Fabrication des plaques : la fabrication de chaque presse individuelle qui prend place de part et d'autre de la presse thermique à d'abord été entreprise au sein du département du génie mécanique, où il a été possible de couper et préparer les pièces qui composent la structure de chaque presse, puis par la suite par manque de temps et de moyens la fabrication à été poursuivie dans l'atelier de fabrication mécanique METAL DJOUDI situé à Dergana les opérations ont été porté à aboutissement et deux faces de la presses thermiques ont finalement pris forme.
3. La fabrication du moule : le moule utilisé pour la fabrication des plaques composites est fabriqué dans l'atelier du département du génie mécanique, il est constitué de fer plat et ayant les dimensions exterieurs 250x250mm et interieurs 200x200mm, et d'épaisseur de 3.5 mm
4. Le montage : Une fois les pièces prêtes et finis, elles furent déplacées au labo du génie de l'environnement de l'école polytechnique pour monter l'ensemble des pièces de la presse comprenant les deux presses, la charpente métallique et et la partie electronique (capteurs thermiques et afficheur de température) deux capteurs thermiques.

2.3.1 Préparation des Feuilles de Luffa



Figure 14 Etat de la fibre de Luffa avant ouverture

Chapitre II: Matériels & Méthodes



Figure 15 Etat de la fibre de Luffa après ouverture

Les feuilles de Luffa ont été acquises dans des lieux de ventes communs et préférablement choisis de telle sorte à être de dimensions relativement importante afin d'offrir un plus ample espace de travail, aussi les feuilles caractérisées par une certaine clarté de couleur présentaient, en générale, une structure plus solide et robuste en comparaison aux échantillons de couleurs plus sombres.

Les feuilles ont été ensuite découpées au ciseau (Figure 14) et (Figure 15) sous forme de plaques carrés de dimensions 200x200mm afin de répondre à la forme du moule que nous utiliserons pour faire couler et fabriquer les plaques composites (Figure 16) et (Figure 17), par la suite elles sont compressés seuls (sans aucun ajout d'autre renfort) uniquement afin de réduire leur tailles pour faciliter leur manipulations.

Cette étape de pré-pressage facilitera le travail étant donné que la réalisation des plaques s'effectuera en groupe de trois : plaques d'un seul pli, plaques de deux plis et plaques formées de trois plis.



Figure 16 Feuilles de Luffa découpées en formes de carrés avant pression



Figure 17 Feuilles de Luffa découpées en formes de carrés après pression

2.3.2 Traitement chimique des feuilles de Luffa

Aussi afin de pouvoir évaluer l'apport d'un traitement chimiques sur la fabrication de ces matériaux composites a base naturelle de Luffa, Les feuilles de Luffa découpées seront traitées avec deux traitements distincts, le premier consistant en un traitement à l'Hydroxyde de Sodium NaOH et le second en un traitement au Permanganate de Potassium (KMnO₄). Les deux procédés de traitement sont donc les suivants :

- Traitement au NaOH :
- Traitement au KMnO₄ :

Chapitre II: Matériels & Méthodes

Ainsi si l'on prends en considération la répartition des plaques obtenues selon le nombre de plis compris et le type de traitement suivis nous obtenons, en ajoutant une plaque vierge faite entièrement en PSV le tableau 7 suivant

Tableau 7 Répartition du nombre et du type de plaque à réaliser pour l'étude

Plaques traitées au NaOH	Plaques traitées au KMnO4
1 plis	1 plis
2 plis	2 plis
3 plis	3 plis

2.3.3 Méthode de traitements des feuilles de Luffa :

1. Traitement au NaOH

L'échantillon traité selon ce procédé est immergé dans une solution NaOH à 5% d'un Litre préparée en dissolvant 50g de NaOH dans 1000ml d'eau distillée et ceci durant une période de 30min. Par la suite les feuilles de Luffa sont extraites de cette solution de Soude pour être ensuite plongées dans une solution de 1% de H₂SO₄ préparée en dissolvant 5.6ml de H₂SO₄ dans un Litre d'eau distillée(Figure 18).

A la fin de la durée de traitement les fibres sont ensuite rincées abondamment à l'eau courante.

$$C_{initiale} \rho_{H_2SO_4} V_{H_2SO_4} = C_{finale} \rho_2 V_{finale}$$

$$V_{H_2SO_4} = \frac{C_{finale} \rho_2 V_{finale}}{C_{initiale} \rho_{H_2SO_4}} = \frac{1\% \times 1,004 \times 1000}{98\% \times 1.83}$$

$$V_{H_2SO_4} = 5,59 \approx 5,6 \text{ ml}$$

2. Traitement au KMnO4

L'échantillon traité selon ce procédé est immergé dans une solution de KMnO₄ à 0.02% préparée en diluant 0.2g de KMnO₄ dans 1000ml d'acétone et ceci durant une période de 3min(Figure 18).

A la fin de la durée de traitement les fibres sont ensuite rincées abondamment à l'eau courante.



Figure 18 Bac usité afin d'effectuer le traitement chimique des feuilles de Luffa

2.4 Méthode d'élaboration des plaques composites biosource à l'aide de la presse thermique

2.4.1 Préparation du moule et l'empilement des plis

- Découpe des feuilles de Luffa au ciseau selon les dimensions du cadre en fer plat en carrés de 200x200mm.
- Appliquer le traitement chimique correspondant (NaOH ou KMnO₄) aux plaques obtenues.
- Laisser les feuilles de Luffa traitées chimiquement séchées complètement.
- Appliquer un pré-pression sur les feuilles en les plaçant directement entre les faces de la presse thermique sans utiliser le moule ceci afin de réduire son volume et faciliter la mise en place du polystyrène entre les plis du Luffa.
- Préparer le moule en y versant uniformément dans son fond une couche de polystyrène cristallin.
- Mettre un pli de feuille de Luffa sur la couche de polystyrène.
- Ajouter une autre couche homogène de polystyrène sur le pli de Luffa.
- Continuer selon le nombre de plis prévu à alterner entre un pli de Luffa et une couche homogène de polystyrène (Figure 19)
- En ce qui concerne la plaque vierge, l'espace du moule est entièrement rempli de PS sans ajout de fibre végétale (Figure 20)
- Il est important de mettre une quantité assez conséquente de polystyrène afin de minimiser au plus possible le nombre de bulles d'air qui pourraient apparaître lors de la fonte des particules de polystyrène au cours du processus de formation de la plaque.

Chapitre II: Matériels & Méthodes

- A la fin couvrir le moule avec la plaque supérieur d'aluminium puis l'introduire entre les plaques de la presse thermique.

2.4.2 Mise en œuvre de la presse thermique

- Faire mettre en marche la presse thermique et attendre que les deux faces de la presse atteignent une température suffisante (autour de 160°C) pour permettre au particules de polystyrène de fondre.
- À l'aide du levier faire descendre manuellement la presse supérieure sur la presse inférieure.
- Faire arriver la presse supérieure juste au contact de la plaque supérieur en aluminium du moule, à ce point arrêter momentanément le processus de compression afin de permettre au particules d'entamer leur fusion et éviter des déchirures au niveau des plis des feuilles de Luffa.
- Après un certain moment, suite à la fusion du polystyrène, la poursuite de la compression devient plus facile et sans danger pour l'intégrité des feuilles de Luffa.
- Continuer la compression jusqu'à atteindre une pression entre 4-5bars(Figure 21).
- Arriver à ce point de pression (entre 4 et 5 bars) les plis de Luffa avec le renfort sont suffisamment comprimés.
- Laisser les plis dans cet état de compression sans ouvrir la presse cependant en arrêtant l'alimentation en électricité , pour permettre au matériau composite de poursuivre son mécanisme de cohésion et parallèlement permettre au plaques de la presse de refroidir.
- Après un certain moment (5-10min) les plaques de la presse peuvent être ouverte pour libérer le moule, ce dernier ayant refroidit assez pour être extrait à l'aide d'un outil isolant à la chaleur pour être ensuite refroidit à l'eau courante.
- Une fois le moule complètement refroidis de manière à permettre une manipulation à mains nues sans risques, les deux plaques en aluminium du moule sont ouvertes pour extraire le cadre en fer plat qui contient la plaque du matériau composite Luffa-polystyrène.
- À l'aide d'un outil contondant la plaque de Luffa est extraite délicatement du cadre de fer plat.



Figure 19 Etapes de la fabrication des plaques de composites : le garnissage en PS



Figure 20 Etapes de la fabrication des plaques de composites : Fabrication de la plaque vierge



Figure 21 Etapes de la fabrication des plaques de composites : thermocompression



Figure 22 Plaques obtenues par thermocompression



Figure 23 Plaque vierge obtenue par thermocompression



Figure 24 Plaque de fibre traitée au NaOH de 2 plis obtenue par thermocompression

Par la suite, une fois l'ensemble des plaques fabriquées et extraites grâce à ce dispositif (Figure 22) et (Figure 23), les plaques sont disposées et préparées(Figure 24) afin d'y couper des éprouvettes haltères au mesures normalisées à l'aide de la découpe laser, ceci afin de procéder à la phase de caractérisation.

La caractérisation des matériaux composites obtenues est réalisée par différentes méthodes : l'analyse spectroscopique infrarouge, l'essai de traction et le test de densité, ainsi que les analyses de microscopie optique, l'ensemble de ces caractérisations ont été réalisées dans le Centre de recherche en technologies industrielles (CRTI).

Chapitre II: Matériels & Méthodes

2.5 Analyse spectroscopique infrarouge à Transformée de Fourier en mode Réflexion Totale Atténuée (FTIR-ATR)

La spectroscopie d'infrarouge permet de déterminer la présence de groupements fonctionnels dans les molécules organiques, et les structures dans certaines molécules simples.[26]

Les spectres infrarouges des fibres brutes et traitées ont été obtenus au moyen de la technique de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier en mode Réflexion Totale Atténuée (FTIR- ATR). Cette méthode permet la qualification des structures moléculaires à travers les bandes d'absorbance des groupements fonctionnels[5]

L'analyse spectrale par FTIR-ATR est effectuée dans le but d'étudier l'existence d'éventuelles interactions entre la matrice thermoplastique et les fibres de Luffa traitée et non traitée [27]

La caractérisation a été effectuée au Centre de recherche en technologies industrielles (CRTI)

Les spectres ATR-FTIR ont été enregistrés à l'aide de l'instrument Cary 630 FTIR (Agilent Technologies) (Figure 25) à température ambiante pour des nombres d'onde allant de 4000 à 400 cm^{-1} et avec une résolution spectrale de 4 cm^{-1} . [4]



Figure 25 Spectroscopie IRTF-ATR

2.6 Découpage Laser

La découpe laser est un procédé de fabrication qui consiste à découper la matière grâce à une grande quantité d'énergie générée par un laser et concentrée sur une très faible surface (Figure 26) Cette technologie est majoritairement destinée aux chaînes de production industrielles, mais peut également convenir aux boutiques, aux établissements professionnels et aux tiers-lieux de fabrication. La gravure laser se fait avec la même technologie, mais en utilisant une puissance laser réduite.[28]

LASER signifie amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement[28]:

Chapitre II: Matériels & Méthodes

- L Light
- A Amplification
- S by Stimulated
- E Emission
- R of Radiation

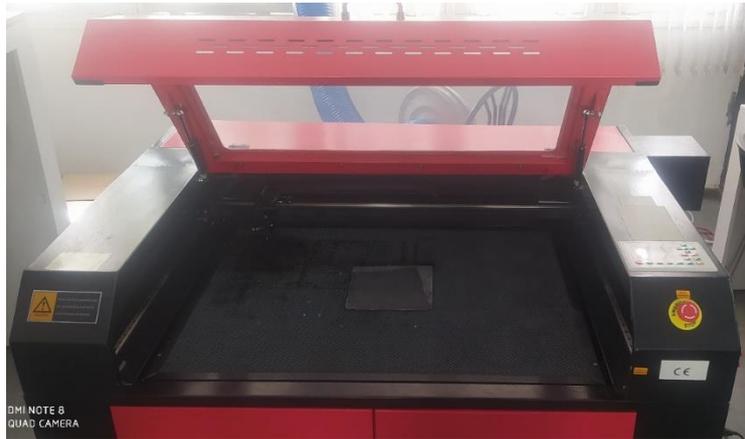


Figure 26 Machine de découpage Laser du Fablab de l'ENP

La découpe laser eu lieu dans le centre Fablab de l'école nationale polytechnique avec une machine de marque Sihao, 100 Watts-9060(Figure 27)

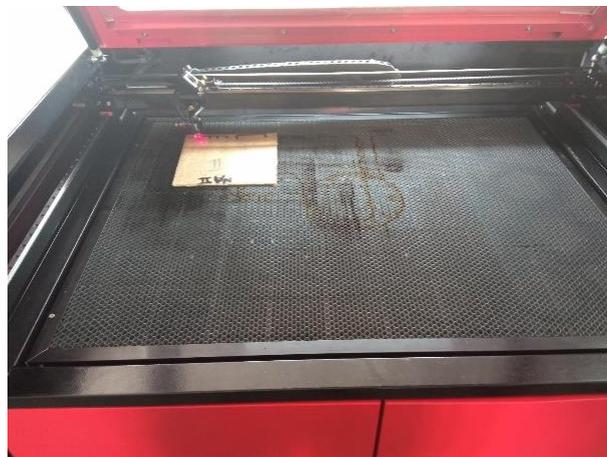


Figure 27 Machine de découpage laser mise en marche

La focalisation d'un rayon laser permet de chauffer jusqu'à vaporisation une zone réduite de matière (Figure 28). Les lasers utilisés couramment ont une puissance de 4000 watts mais les sources peuvent varier de quelques watts à plus de 7 kW. La puissance est adaptée en fonction du matériau et de l'épaisseur à découper. À titre de comparaison, un laser de classe II potentiellement dangereux a une puissance de moins de 1 mW. Ce procédé permet une découpe précise, nette et rapide de nombreux matériaux jusqu'à 25 mm. La découpe se fait

Chapitre II: Matériels & Méthodes

sans effort sur la pièce et la zone affectée thermiquement (ZAT) est assez faible (de l'ordre de 0,5 mm sur les métaux) ce qui permet d'avoir des pièces très peu déformées. La réalisation de trou est facile mais leur diamètre doit être au moins égal à l'épaisseur de la tôle quand cette tôle est supérieure à 10 mm. Certains matériaux, comme l'argent, ou le cuivre, sont toutefois plus difficiles à découper au laser à cause de leur fort pouvoir réfléchissant, dans ce cas, mieux vaut utiliser la découpe par jet d'eau haute pression[28]

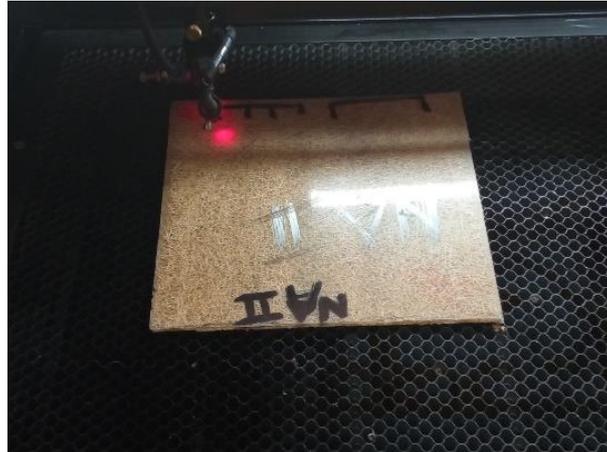


Figure 28 Découpage des éprouvettes de type haltère sur la plaque de NaOH de 2 plis

2.7 Dimensions des éprouvettes obtenues

Ci-dessous les tableaux récapitulatifs contenant les dimensions des éprouvettes obtenues après découpe Laser, le découpage a été réalisé selon la norme traduite dans la figure suivante (Figure 29)

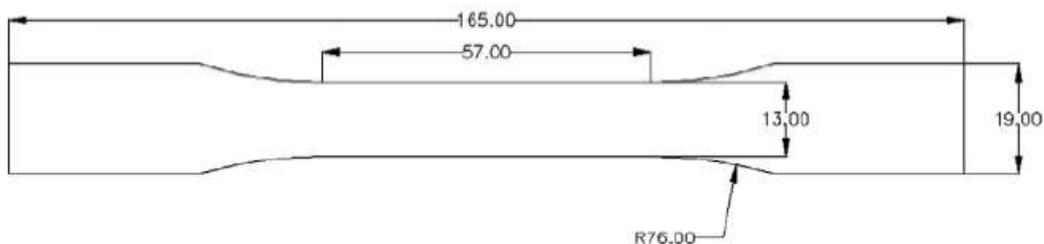


Figure 29 Epreuve de traction (Norme ASTM D638) [29]

Ainsi les éprouvettes obtenues par découpe laser ont été mesurées, les valeurs des mesures sont représentées dans les tableaux suivants :

Tableau 8 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque traitée au NaOH de 1 pli

NaOH 1 pli	Moyenne des Largeur	Moyenne des Epaisseur
Eprouvette 1	13,80	3,46

Chapitre II: Matériels & Méthodes

Eprouvette 2	13,83	3,53
Eprouvette 3	13,83	3,43
Eprouvette 4	13,80	3,57
Eprouvette 5	13,83	3,43

Tableau 9 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque traitée au NaOH de 2 plis

NaOH 2 plis	Moyenne des Largeur	Moyenne des Epaisseur
Eprouvette 1	13,90	3,83
Eprouvette 2	13,86	3,86
Eprouvette 3	13,86	3,86
Eprouvette 4	13,86	3,76
Eprouvette 5	13,90	3,83

Tableau 10 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque traitée au NaOH de 3 plis

NaOH 3 plis	Moyenne des Largeur	Moyenne des Epaisseur
Eprouvette 1	13,93	4
Eprouvette 2	13,96	3,86
Eprouvette 3	13,96	3,9
Eprouvette 4	13,93	3,93
Eprouvette 5	13,93	3,93

Tableau 11 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque traitée au KMnO₄ de 1 pli

KMnO ₄ 1 pli	Moyenne des Largeur	Moyenne des Epaisseur
Eprouvette 1	13,76	3,66
Eprouvette 2	13,77	3,70
Eprouvette 3	13,80	3,66
Eprouvette 4	13,77	3,70
Eprouvette 5	13,76	3,66

Tableau 12 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque traitée au KmNO₄ de 2 plis

KMnO ₄ 2 plis	Moyenne des Largeur	Moyenne des Epaisseur
Eprouvette 1	13,90	3,66
Eprouvette 2	13,86	3,63
Eprouvette 3	13,86	3,66
Eprouvette 4	13,86	3,63
Eprouvette 5	13,90	3,66

Chapitre II: Matériels & Méthodes

Tableau 13 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque traitée au KMnO_4 de 3 plis

KMnO4 3 plis	Moyenne des Largeur	Moyenne des Epaisseur
Eprouvette 1	13,8	4,30
Eprouvette 2	13,76	4,28
Eprouvette 3	13,76	4,30
Eprouvette 4	13,80	4,30
Eprouvette 5	13,76	4,30

Tableau 14 Mesures des 5 éprouvettes de la plaque vierge

Vierge 1 pli	Moyenne des Largeur	Moyenne des Epaisseur
Eprouvette 1	13,83	3,60
Eprouvette 2	13,86	3,63
Eprouvette 3	13,86	3,56
Eprouvette 4	13,83	3,63
Eprouvette 5	13,86	3,63

2.8 Test de Traction

Les essais de traction ont été réalisés au niveau du CRTI sur une machine de traction de marque MTS Criterion (Figure 30) à température ambiante avec une vitesse de déplacement 2 mm/min. Ce test consiste à soumettre l'éprouvette à un étirement avec une vitesse constante, et on relève à l'aide de l'ordinateur la force de traction nécessaire en fonction de l'allongement.

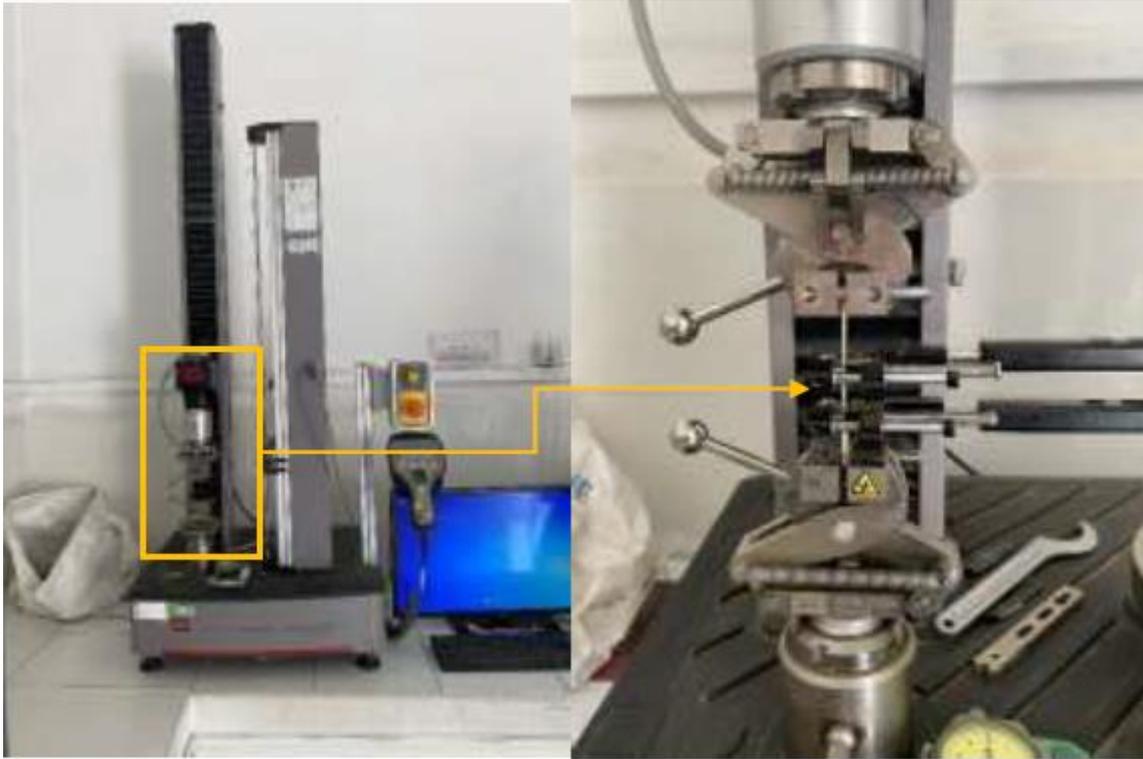


Figure 30 Machine utilisé pour l'essai de traction[4]

2.9 Microscopie optique

Cette technique a été utilisée dans le but d'observer la morphologie des fibres traitées et non traitées ainsi que les échantillons de bio-composites, cette opération a été réalisée dans le CRTI à l'aide d'un microscope optique. Une analyse optique de la facies de rupture a aussi été réalisée

2.10 Mesure de la densité (méthode de la double pesée)

Parmi les objectifs de l'élaboration des matériaux composites c'est d'avoir un matériau plus léger donc de densité inférieure dont les avantages apparaîtront essentiellement sur le plan financier et énergétique.[5]

Le test de densité des éprouvettes à différent taux de fibre a été effectué au laboratoire du centre de recherche des technologies industrielles 'CRTI' (Figure 31). La mesure de la densité des solides s'effectue au travers du poids et du volume d'un échantillon. Le volume se calcule en exerçant une force sur l'échantillon dans le liquide[4]

Chapitre II: Matériels & Méthodes



Figure 31 Appareillage de la mesure de densité.[4]

Chapitre III : Résultats & Discussion

Chapitre III : Résultats & Discussion

Chapitre III : Résultats & Discussion

3.1 Calcul du taux de fibre obtenu

Le tableau ci-contre regroupe les taux de fibres obtenues après fabrication des plaques composites

Tableau 15 Masse des plaques avant et après thermocompression et taux de fibre

Type \ Plis	1pli			2plis			3plis		
	M1(g)	M2(g)	TDF	M1(g)	M2(g)	TDF	M1(g)	M2(g)	TDF
NaOH	8,8	138,3	6,5%	18,2	148,1	12,29%	27,8	154,6	18,05%
KMnO4	9	134,9	6,7%	18,3	141,1	12,96%	27,3	155,2	17,56%

M1 : masse de la feuille avant élaboration de la plaque bio-composite en gramme.

M2 : masse de la feuille après élaboration de la plaque bio-composite en gramme.

TDF : taux de fibre. $TDF = \frac{M1}{M2} \times 100$

3.2 Analyse morphologique de la fibre

Les figures suivantes illustrent la morphologie de la fibre de luffa avant et après traitement

On peut observer (Figure 32) une morphologie en forme de nid d'abeille avec une orientation des fibres qui n'est pas unidirectionnelle dans les deux axes horizontale et vertical (une orientation aléatoire) ce qui donne un aspect de cellules.

On observe (Figure 33) et (Figure 34) que la qualité des feuilles de Luffa a augmenté après traitement, en particulier celle traitée au NaOH qui présente un meilleur état de surface avec une surface de fibres rugueuse ce qui permet d'avoir une bonne adhésion interfaciale avec la matrice de polystyrène. [30]

La figure 35 confirme de plus les résultats cités précédemment et montre la supériorité de qualité de l'état de surface de la fibre traitée au NaOH [31]

Chapitre III : Résultats & Discussion

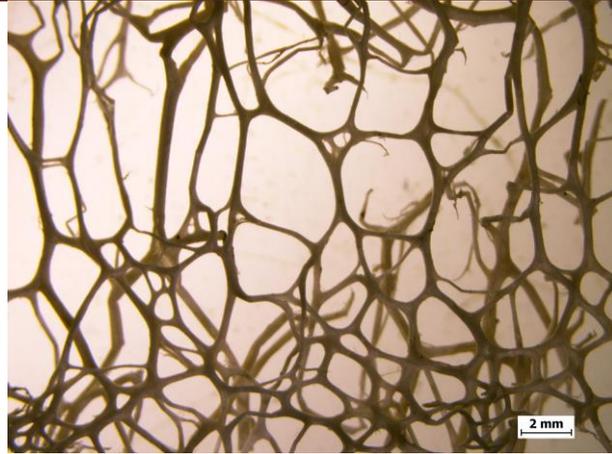


Figure 32 Morphologie du Luffa traitée au NaOH avec un objectif X0.67



Figure 33 Morphologie du Luffa non traité avec un objectif X50

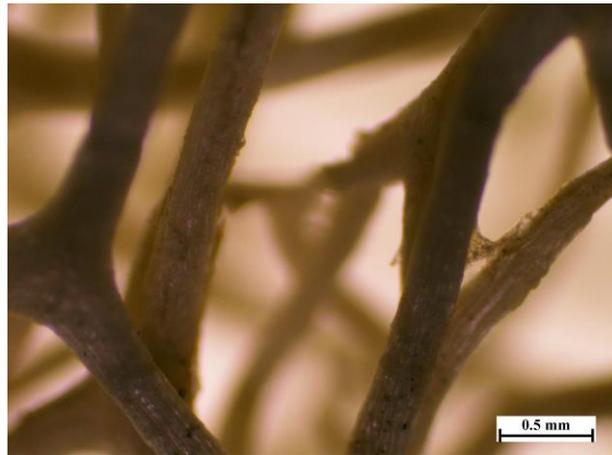


Figure 34 Morphologie du Luffa traitée au KMnO4 avec un objectif X50



Figure 35 Morphologie du Luffa traitée au NaOH avec un objectif X50



Figure 36 Morphologie du Luffa traitée au NaOH avec un objectif x 0.9

3.3 Analyse spectroscopique infrarouge à Transformée de Fourier en mode Réflexion Totale Atténuée (FTIR-ATR)

Les résultats de l'analyse spectroscopique (Figure 37) sont exploités à l'aide de tables trouvés dans la littérature scientifique [26][6] [4] dans des tables sont celle les suivantes :

- A $1200-1260\text{ cm}^{-1}$, un pic qui correspond à la vibration de déformation des liaisons CH.
- A $1230-1270\text{ cm}^{-1}$ un pic correspondant à la vibration de déformation des liaisons CH
- Aux alentours 1335 cm^{-1} , des pics correspondant aux vibrations d'élongation symétrique et asymétrique de la liaison N-O du groupes $\text{C}=\text{C}-\text{NO}_2$ ou $\text{Ar}-\text{NO}_2$

Chapitre III : Résultats & Discussion

- Aux alentours 1370 cm^{-1} , des pics correspondant aux vibrations d'élongation symétrique et asymétrique de la liaison N-O du groupes R-NO₂
- A $1400\text{-}1460\text{ cm}^{-1}$ des pics correspondant aux vibrations de déformation asymétrique des liaisons C-H du cycle aromatique.
- $1450\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ des pics sont attribués aux vibrations d'élongation des liaisons C=C élongation des composés aromatiques.
- A $1600\text{-}1650\text{ cm}^{-1}$ des pics sont attribués aux vibrations d'élongation des hydroxyles O-H de l'eau.
- A 1720 cm^{-1} , une bande qui apparait faible, peut être assignée à la vibration des groupements carbonyles C=O.
- A 1735 cm^{-1} , un pic correspondant à la vibration des groupements carbonyles C=O.
- A $2100\text{-}2140\text{ cm}^{-1}$ des pics sont attribués aux vibrations d'élongation des liaisons C≡C en groupe alcyne.
- A $2850\text{-}2950\text{ cm}^{-1}$, des pics correspondant aux vibrations d'élongation symétrique et asymétrique de la liaison C-H du groupes (-CH₂).
- Une large bande autour de 3350 cm^{-1} qui correspond à la vibration d'élongation des hydroxyles O-H de la fibre.
- $3265\text{-}3335\text{ cm}^{-1}$ un pic correspondant à la vibration de l'élongation des liaisons polymériques nC-H



Sample ID:LUFFA LNT
Sample Scans:16
Background Scans:8
Resolution:16
System Status:Good
File Location:C:\Users\Public\Documents\Agilent\MicroLab\Results\LUFFA LNT_2022-07-27T16-27-57.a2r

Method Name:methode mk
User:CRTI
Date/Time:07-27-2022 4:27:57 PM
Range:4000 - 650
Apodization:BoxCar (None)

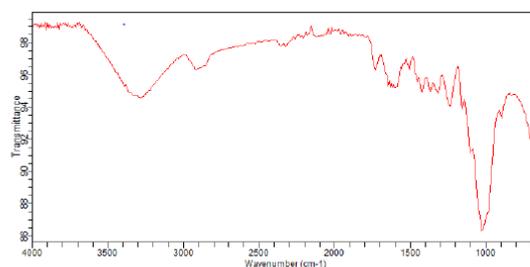


Figure 37 Spectre FTIR-ATR de la fibre Luffa traitée au KMnO₄

Chapitre III : Résultats & Discussion

3.4 Test de Traction

3.4.1 Module de Young

En observant les histogrammes ci-dessus (Figure 38), (Figure 39) et (Figure 40) on constate une augmentation générale de la valeur du Module de Young (Module d'élasticité) après introduction de la fibre de Luffa à la matrice de PS ce qui confirme l'utilité d'une valorisation de la fibre végétale type Luffa dans un procédé de fabrication de matériaux composites.

Aussi en procédant à la comparaison entre les deux types de traitement on observe aussi que le traitement au NaOH offre toujours un net avantage par rapport au traitement au KMnO_4 démontrant ainsi la supériorité de ce traitement 5% NaOH sur le traitement du 0.02% KMnO_4 en terme de propriété mécanique (Module d'élasticité, valeur de la contrainte maximale).

Enfin on observe autre fois une altération des caractéristiques mécaniques après augmentation du taux de fibres entre les plaques ayant reçu le même type de traitement chimiques, ceci est dû aussi au phénomène d'agglomération relié à l'augmentation du taux de fibres qui, n'étant pas entièrement enveloppées de la matrice de PS, c'est-à-dire ayant un côté un contact fibre-résine et de l'autre côté un contact fibre-fibre induit à un glissement qui conduit à une diminution de la résistance face à la rupture.

Tableau 16 Tableau comparatif des valeurs moyennes du module de Young entre la plaque vierge et les plaques de 1 pli

Plaque	Moyenne des Module Young (Gpa)
PSV	1,77
PSK1	1,76
PSN1	1,96

Chapitre III : Résultats & Discussion

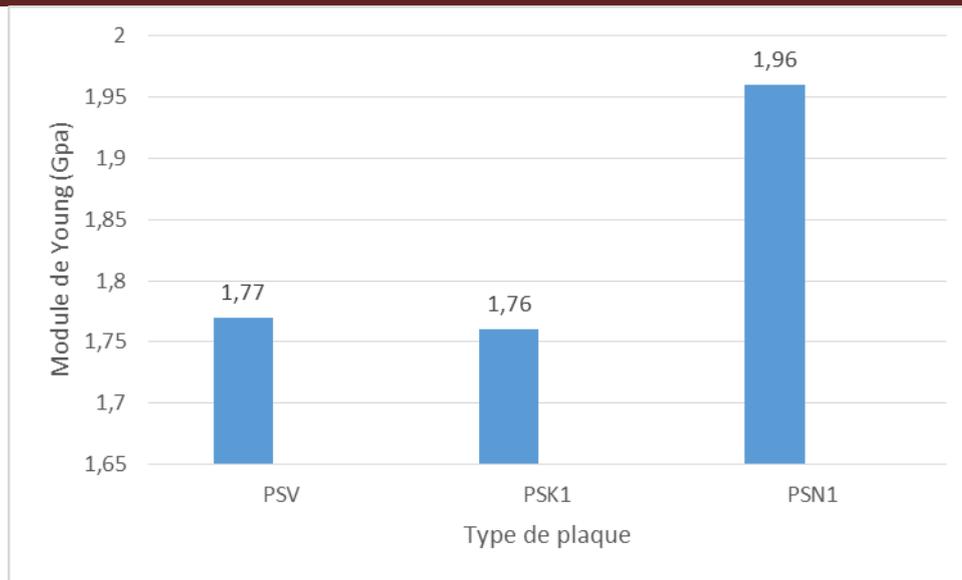


Figure 38 Histogramme comparatif des valeurs moyennes du module de Young entre la plaque vierge et les plaques de 1 pli

Tableau 17 Tableau comparatif des valeurs moyennes du module de Young entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis

Plaque	Moyenne des Module Young(Gpa)
PSV	1,77
PSK2	1,97
PSN2	2,14

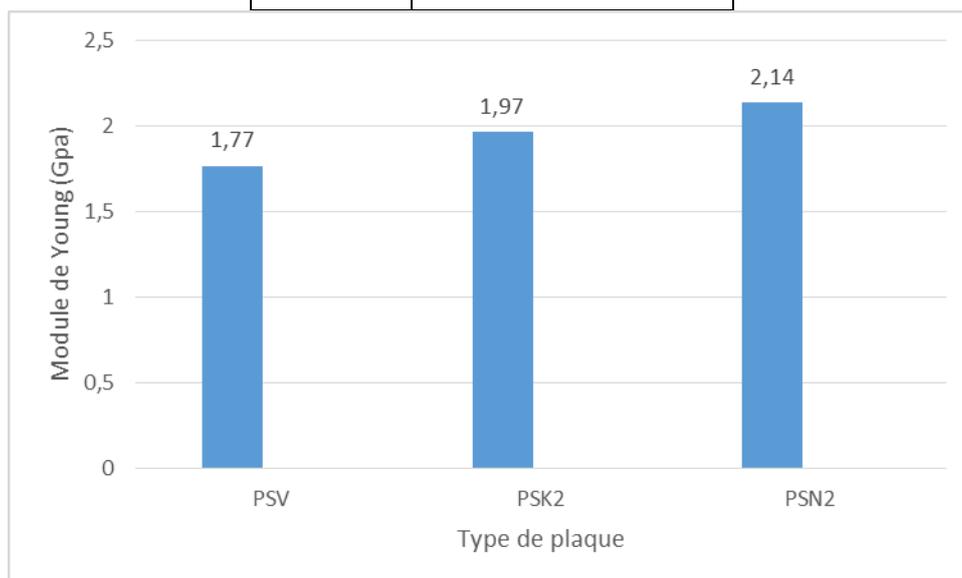


Figure 39 Histogramme comparatif des valeurs moyennes du module de Young entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis

Chapitre III : Résultats & Discussion

Tableau 18 Tableau comparatif des valeurs moyennes du module de Young entre la plaque vierge et les plaques de 3 plis

Plaque	Moyenne des Module Young(Gpa)
PSV	1,77
PSK3	1,97
PSN3	2,03

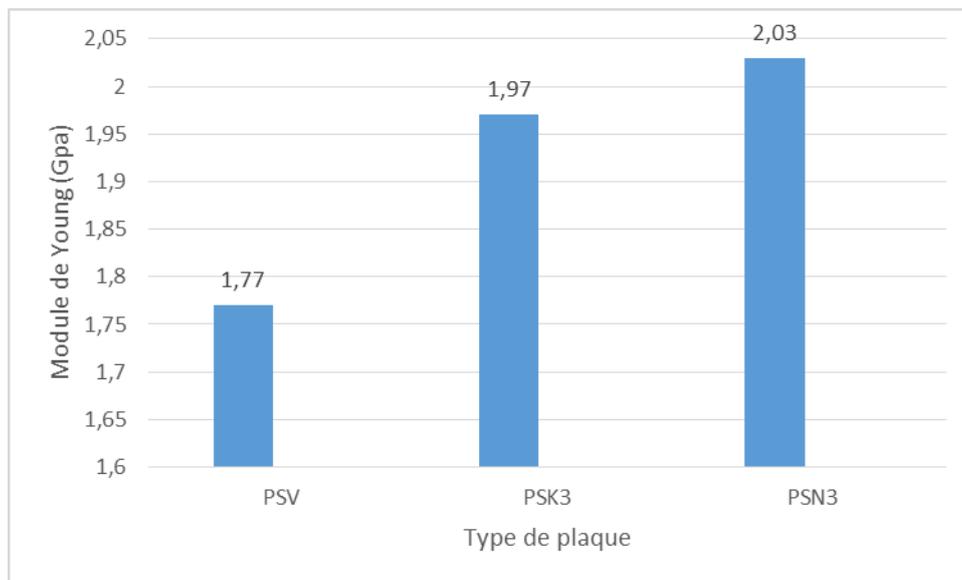


Figure 40 Histogramme comparatif des valeurs moyennes du module de Young entre la plaque vierge et les plaques de 3 plis

3.4.2 Contrainte Maximale

À partir des données obtenues des histogrammes : (Figure 41), (Figure 42), (Figure 43) on constate une baisse de la valeur de la contrainte maximum au niveau des plaques de composites obtenues après introduction des fibres de Luffa pour les deux types de traitement, selon la littérature, cela s'explique en considérant les fibres de luffa étant des fibres à orientation aléatoires, ainsi de par leur morphologie cela induit une diminution de la contrainte opposée, contrairement aux fibres rectilignes à orientation unidirectionnelle qui voient cette valeur augmenter[30][31].

Toutefois, on notera que la valeur de la contrainte maximale obtenue après traitement au NaOH est en majorité toujours supérieure au traitement au $KmNO_4$.

Chapitre III : Résultats & Discussion

Aussi on remarque un baisse du taux de contrainte qui suit l'augmentation du taux de fibres entre les plaques de 2 plis et celles de 3plis, cet aspect revenant au phénomène d'agglomération et qui se traduit par un glissement entre les fibres végétales entre elles après application de la traction mécaniques à cause d'une plus faible dispersion de la phase polystyrène dans la phase végétale dotée d'un taux de fibres plus important.

Tableau 19 Tableau comparatif des valeurs moyennes de la contrainte maximale entre la plaque vierge et les plaques d'un pli

Plaque	Contrainte Max (Mpa)
PSV	25,88
PSK1	14,26
PSN1	21,97

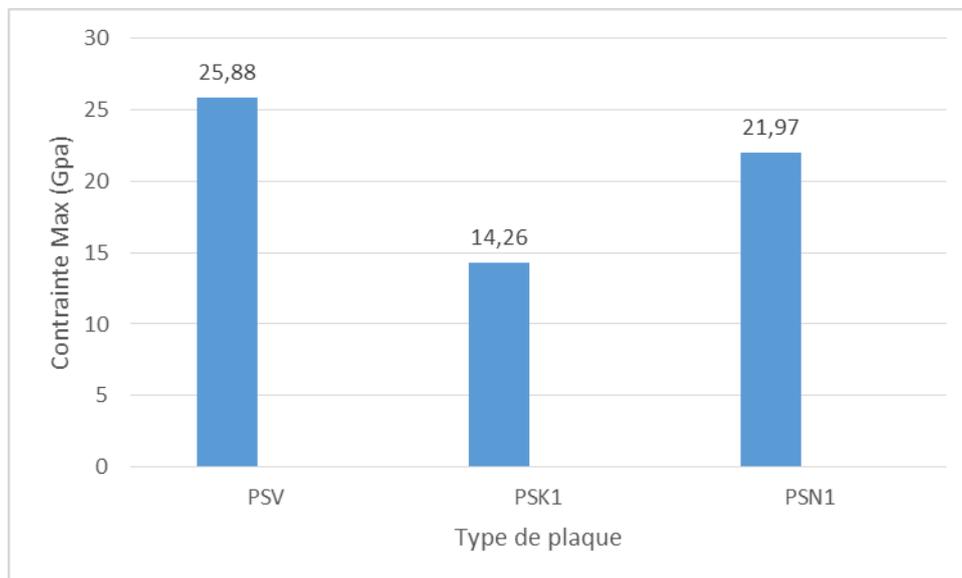


Figure 41 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de la contrainte maximale entre la plaque vierge et les plaques de 1 pli

Tableau 20 Tableau comparatif des valeurs moyennes de la contrainte maximale entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis

Plaque	Contrainte Max (Mpa)
PSV	25,88

Chapitre III : Résultats & Discussion

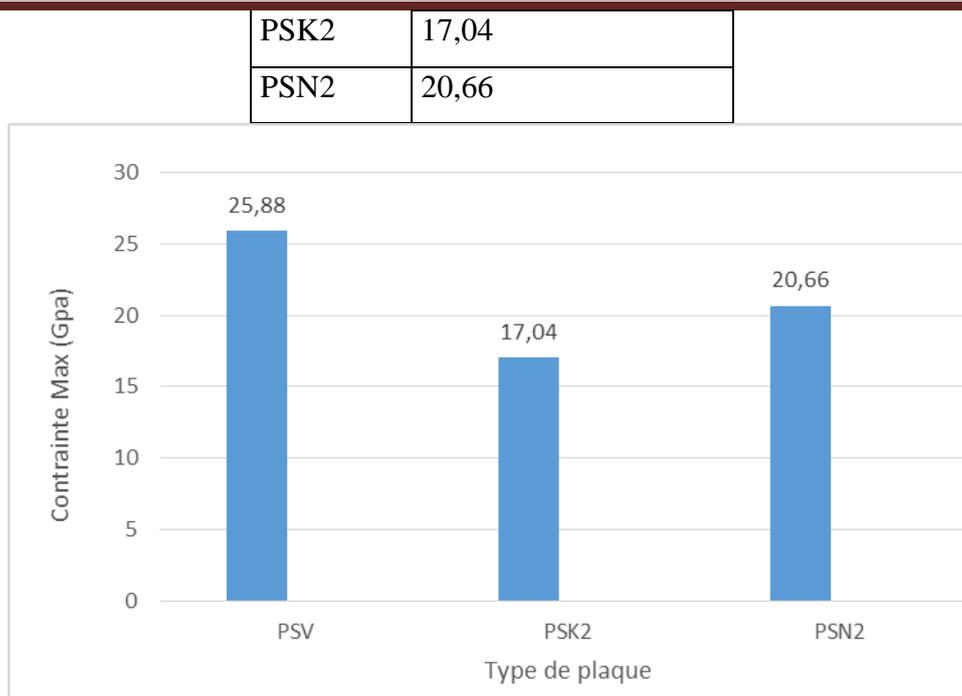
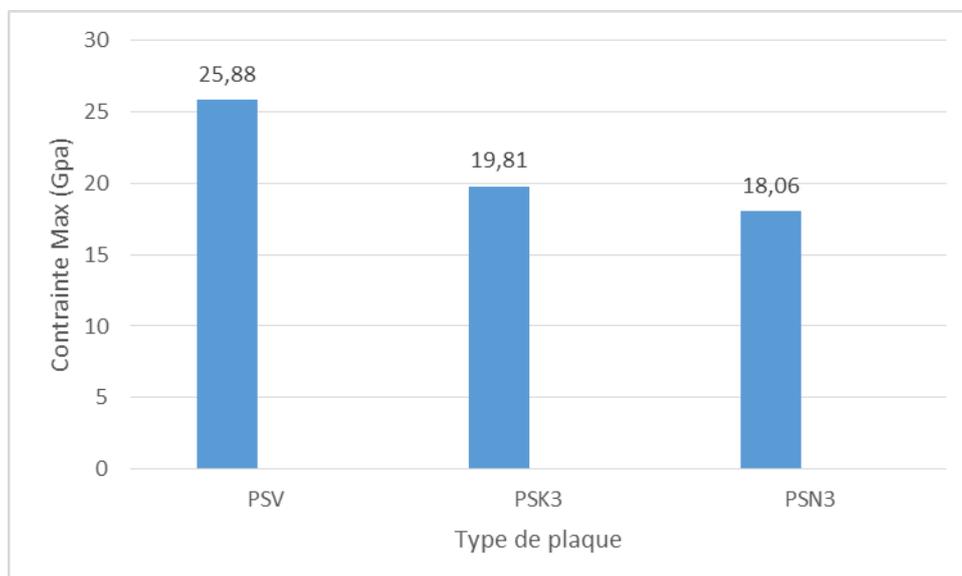


Figure 42 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de la contrainte maximale entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis

Tableau 21 comparatif des valeurs moyennes de la contrainte maximale entre la plaque vierge et les plaques de 3 plis

Plaque	Contrainte Max (Mpa)
PSV	25,88
PSK3	19,81
PSN3	18,06



Chapitre III : Résultats & Discussion

Figure 43 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de la contrainte maximale entre la plaque vierge et les plaques de 3 plis

3.4.3 Déformation

Les résultats obtenus, (Figure 44), (Figure 45) et (Figure 46) on remarque que l'insertion de la fibre végétales du Luffa a donné une nette résistance au composite ceci du faite de la diminution importante du taux de déformation au niveau des éprouvettes soumis aux tests de traction, ceci s'explique par la bonne adhésion inter faciale fibre-matrice.

Par conséquent on peut constater que l'utilisation de ce type de fibre végétale fournit au composite de meilleurs propriétés mécanique et en font un matériau plus résistant et donc garantissant plus de sécurité pour de possible application industriels en pratique.

Aussi on remarque que les plaques soumises au traitement de 5% NaOH présentent une tendance à avoir une déformation moindre donc une résistance plus importante que les plaques traitées au 0.02% KMnO₄, ce qui en fait une méthode plus avantageuse.

.

Tableau 22 Tableau comparatif des valeurs moyennes de la déformation entre la plaque vierge et les plaques d'un pli

Plaque	Déformation (%)
PSV	1,62
PSK1	1,00
PSN1	1,11

Chapitre III : Résultats & Discussion

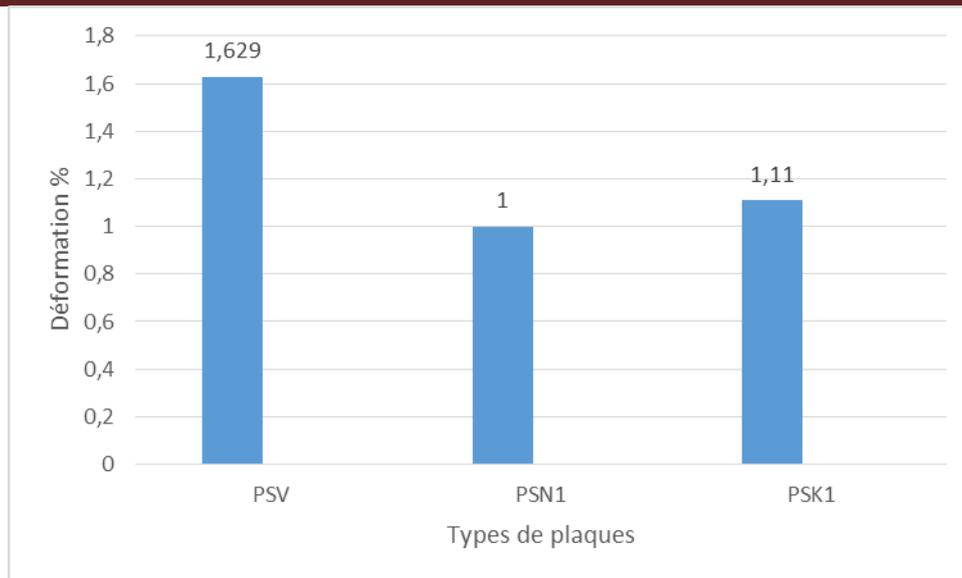


Figure 44 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de la déformation entre la plaque vierge et les plaques d'un pli

Tableau 23 Tableau comparatif des valeurs moyennes de la déformation entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis

Plaque	Déformation (%)
PSV	1,62
PSK2	1,23
PSN2	1,2

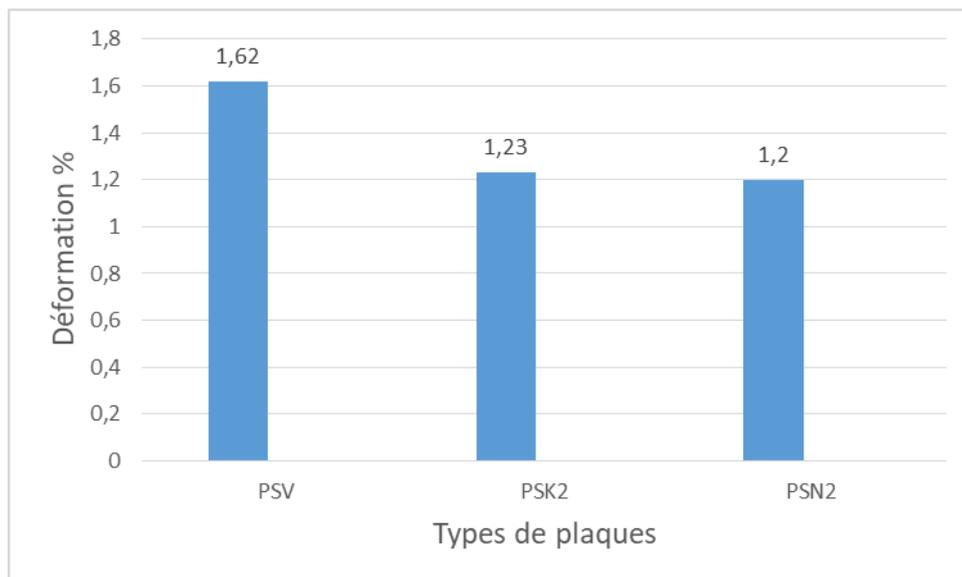


Figure 45 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de la déformation entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis

Chapitre III : Résultats & Discussion

Tableau 24 Tableau comparatif des valeurs moyennes de la déformation entre la plaque vierge et les plaques de 3 plis

Plaque	Déformation (%)
PSV	1,62
PSK3	1,15
PSN3	1,12

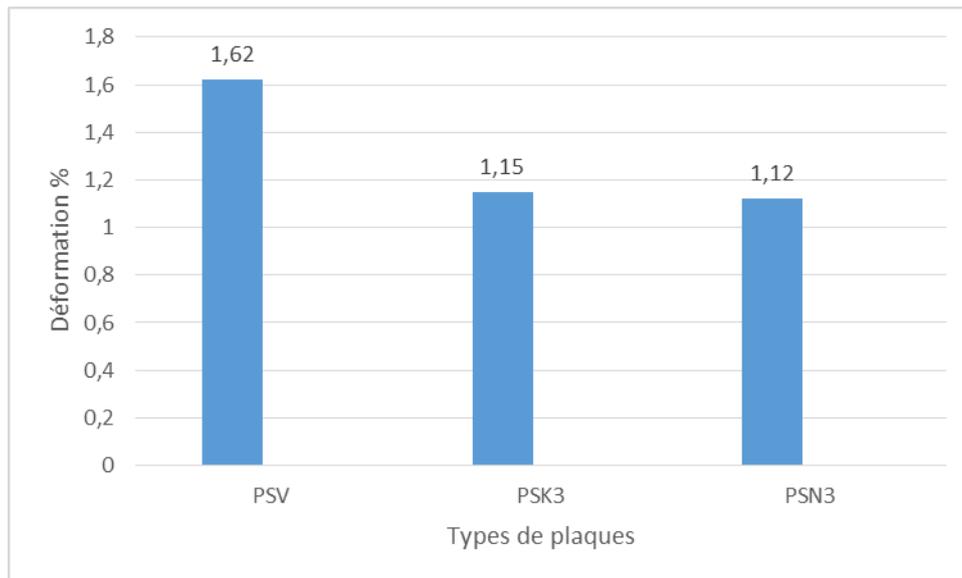


Figure 46 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de la déformation entre la plaque vierge et les plaques de 3 plis

3.5 Microscopie optique

Les figures ci contres de la figure 47 à la figure 53 illustrent la facies de ruptures de éprouvettes après l'essai de traction.

Des résultats obtenus de l'imagerie on observe que pour le cas de la bio-composites ayant un taux de fibres supérieure à 10%, imageries des plaques de fibres de 2 et 3 plis (Figure 49), (Figure 50), (Figure 52), et (Figure 53) une agglomération des fibres est spécialement visible pour les plaques ayant un taux de fibres

D'autre part, pour les bio-composites à fibres taux de fibre inférieure à 10% (Figure 48) et (Figure 51) les fibres ont une apparence bien dispersées dans tout le volume de la matrice.

Toutefois, on en ce qui concerne les plaques réalisées par compression de trois plis de fibres, on peut constater l'apparition d'un phénomène de déchaussement ceci étant car certaines poches se sont formées au niveau d'un côté au lieu au niveau de l'axe de rupture, ce phénomène s'explique aussi au fait de l'agglomération des fibres entre elles suite à

Chapitre III : Résultats & Discussion

l'augmentation du taux de fibre empêchant ainsi la dispersion homogène du polystyrène au à l'intérieur de la plaque de composite, générant ainsi une certaine fragilité par opposition à l'état de structure des plaques ayant un taux de fibres moindre permettant ainsi une meilleur dispersion de la résine entre les fibres de Luffa.

De façon générale on observe que la rupture est selon un seul axe. Cela peut-être expliqué par une bonne adhésion fibre/matrice.

Plaque vierge 1 pli

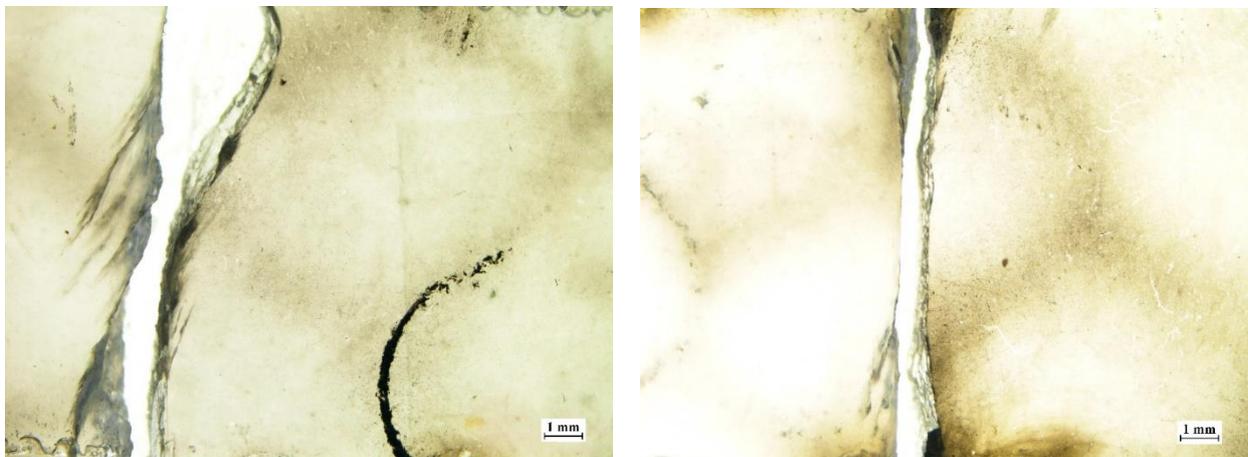
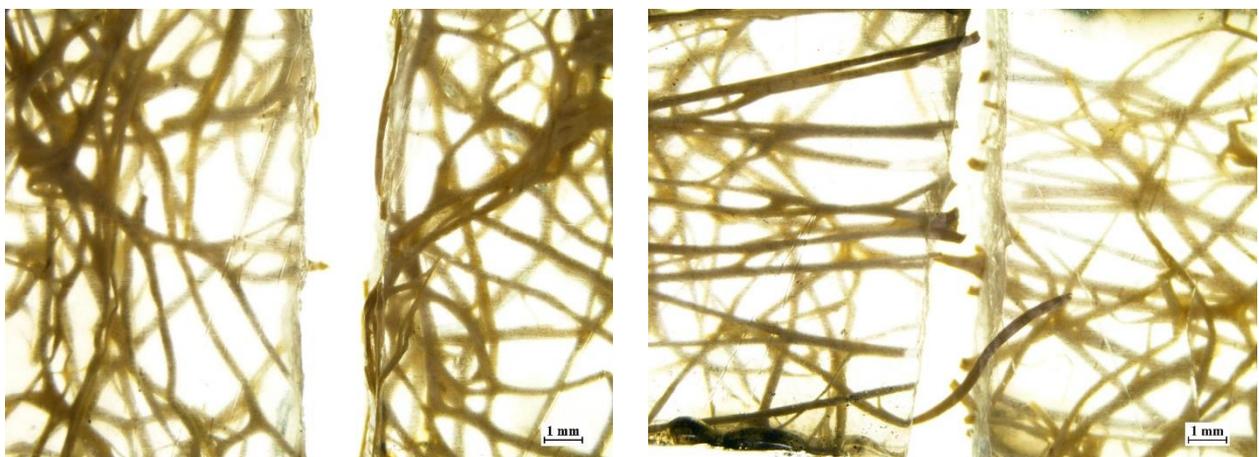


Figure 47 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leur rupture : plaque vierge

Fibre traitées au NaOH 1pli



Chapitre III : Résultats & Discussion

Figure 48 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leur rupture : Plaque traitée au NaOH 1 Pli

Fibre traitées au NaOH 2plis

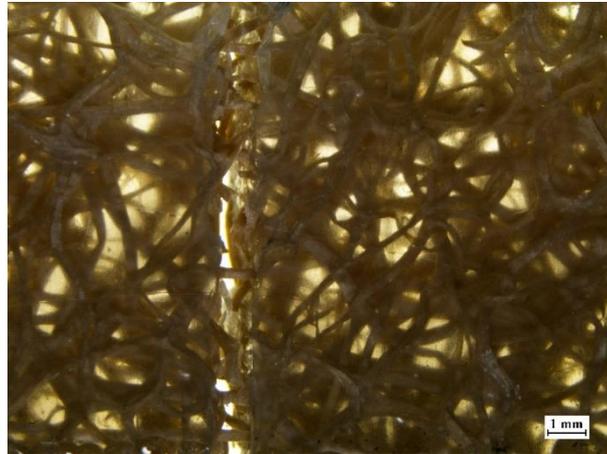


Figure 49 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leurs ruptures : Plaque traitées au NaOH 2 Plis

Fibre traitées au NaOH 3plis

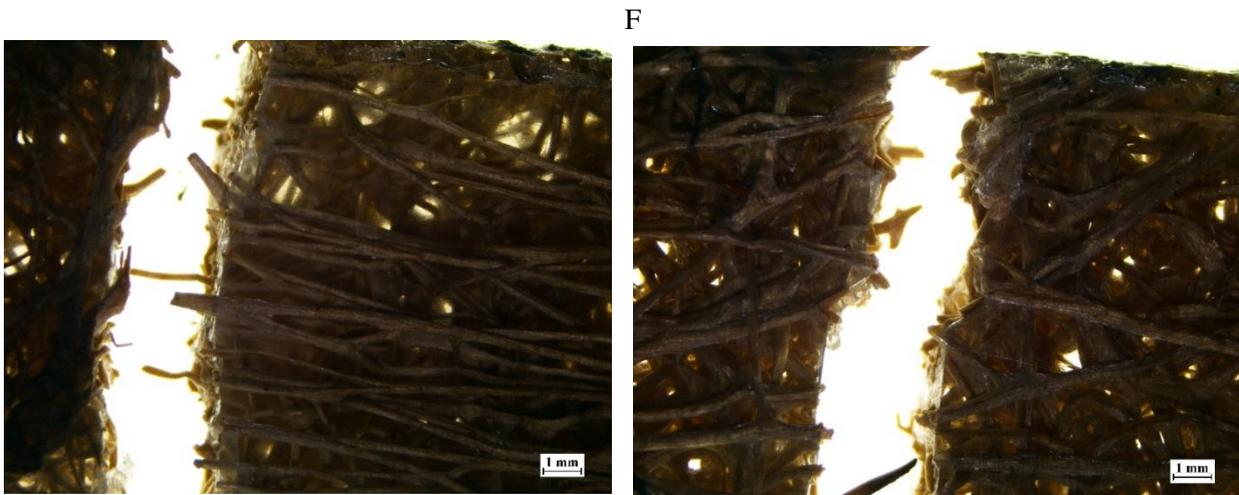


Figure 50 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leurs ruptures : Plaque traitées au NaOH 3 Plis

Chapitre III : Résultats & Discussion

Fibre traitées au KMnO4 1pli

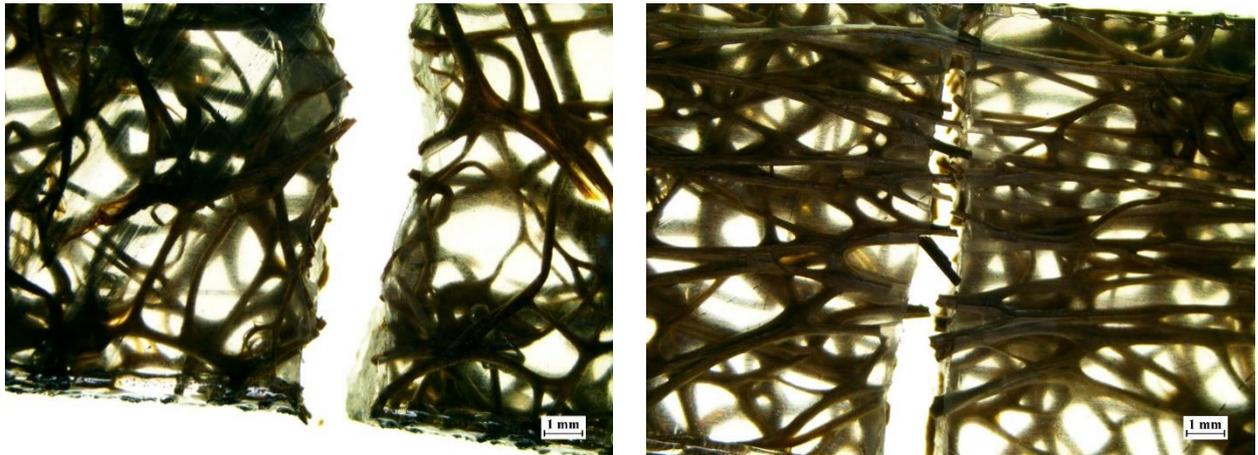


Figure 51 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leurs rupture : Plaque traitées au KMnO4 1 Pli

Fibre traitées au KMnO4 2plis

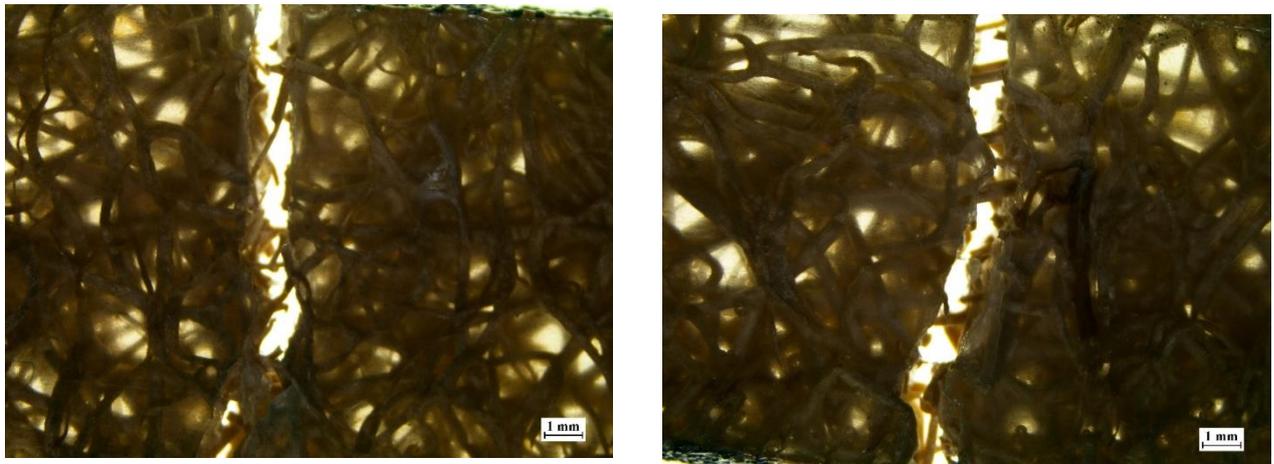
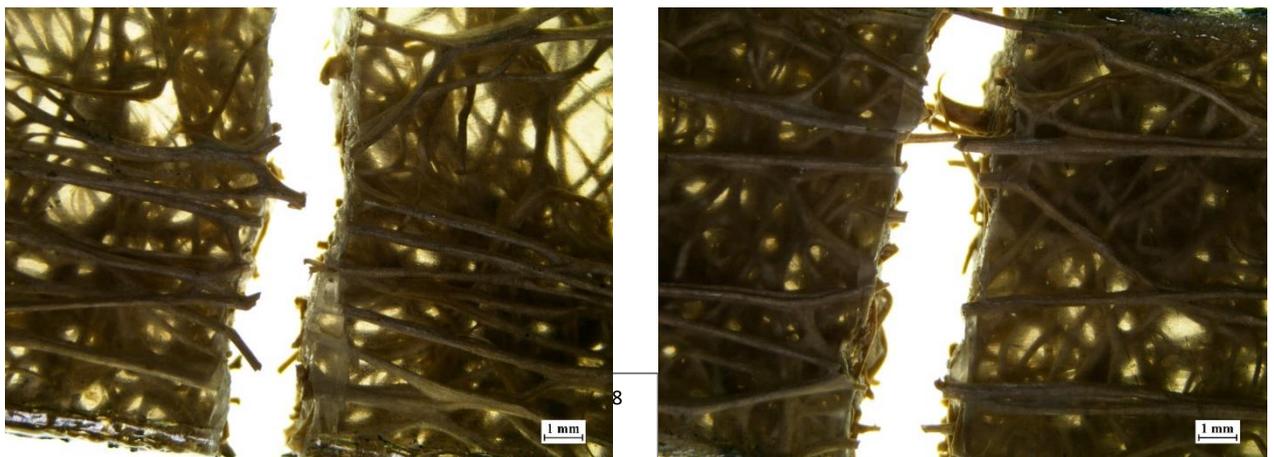


Figure 52 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leurs rupture : Plaque traitées au KMnO4 2 Plis

Fibre traitées au KMnO4 3plis



Chapitre III : Résultats & Discussion

Figure 53 Images microscopique de la distribution des fibres dans la matrice et de leurs rupture : Plaque traitées au KMnO4 3 Plis

3.6 Mesure de la densité (méthode de la double pesée)

En observant les figures (Figure 50), (Figure 51), et (Figure 53) on peut remarquer l'introduction de fibres végétale de Luffa dans la matrice à base de PSV a permis une réduction de la densité du composite obtenu, résultant ainsi en un matériau plus léger.

Cependant il est à noter que la différence du taux de diminution de densité des plaques composites PSV / Luffa traitées sont d'une légère variation, en tenant en considération le paramètre de taux de fibre ou celui du type de traitement.

Tableau 25 Tableau comparatif des valeurs moyennes de densité entre la plaque vierge et les plaques de 1 pli

Plaque	Densité
PSV	1
PSK1	0,98
PSN1	0,99

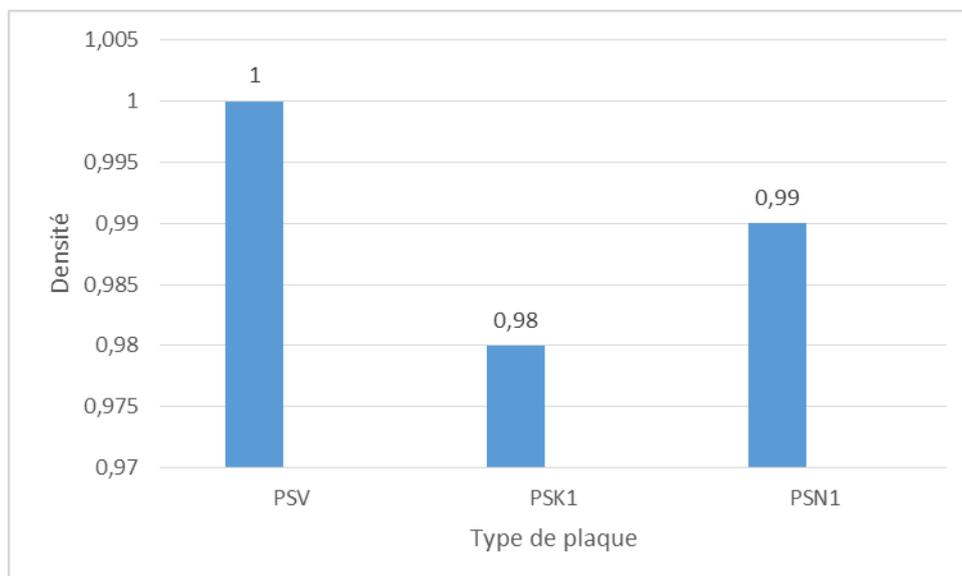


Figure 54 Histogramme comparatif des valeurs moyennes de densité entre la plaque vierge et les plaques de 1 pli

Chapitre III : Résultats & Discussion

Tableau 26 Tableau comparatif des valeurs moyennes de densité entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis

Plaque	Densité
PSV	1
PSK2	1
PSN2	0,99

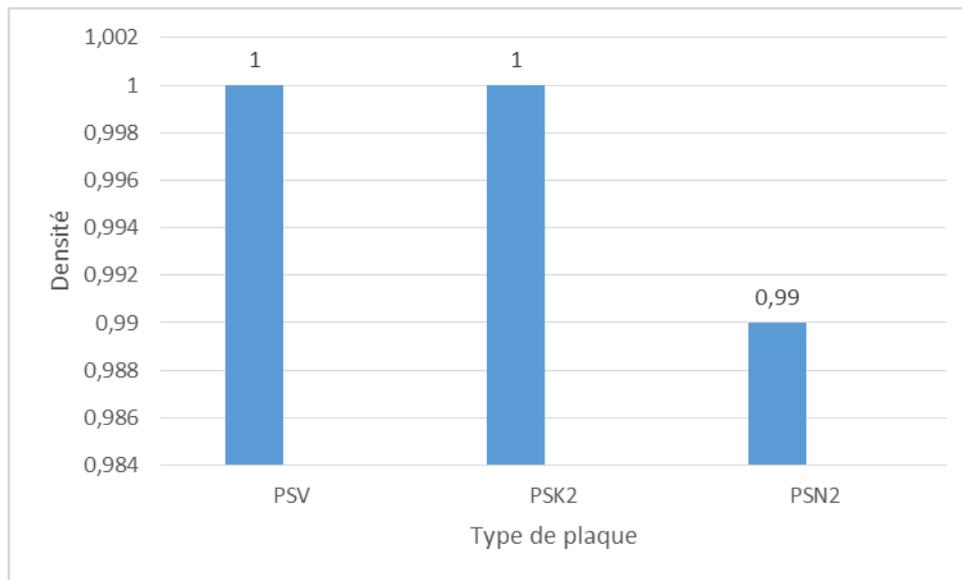


Figure 55 Tableau comparatif des valeurs moyennes de densité entre la plaque vierge et les plaques de 2 plis

Conclusion & Perspectives

Conclusion et perspectives

Conclusion

Le but principal visé par ce travail est la valorisation des fibres végétales dans la fabrication de matériaux composites ceci en exploitant une matière première simple à fournir et à manipuler en l'occurrence les feuilles de Luffa et exploiter ses propriétés caractéristiques afin de pouvoir concevoir un matériau qui soit à la hauteur des exigences des nécessités actuelles dans différents domaines d'actions tout en insistant sur l'aspect propre et durable du procédé de fabrication.

Un des points clés de l'étude fut aussi la réalisation de l'outillage nécessaire pour la compression des composites : la presse thermique ouvrant ainsi la voie à d'autres recherches en ayant à leurs disponibilités un matériel prêt à l'usage.

La valorisation des propriétés de la fibre de Luffa a été effectuée principalement en observant la variation de deux paramètres : le taux de fibres qui a été varié en augmentant le nombre de plis utilisés par plaques fabriquées et le traitement chimique qui a été divisé en deux protocoles : traitement au 5% NaOH et traitement au 0.02%.KMnO₄

Par la suite, les caractérisations appliquées aux échantillons issues des plaques conçues ont permis de recueillir les informations qui ont servi après analyse à comprendre le comportement de ce matériau au renfort végétal, ainsi la spectroscopie FTIR-ATR a permis une plus ample connaissance des groupements chimiques impliqués et qui composent les cellules végétales mis en jeu. En outre, l'analyse au microscope optique vient compléter ces données en permettant de voir au niveau macroscopique la structure des fibres au milieu de la matrice et d'observer le taux de dispersion de cette dernière dans la plaque en fonction des paramètres cités plus haut (taux de fibres et traitement chimique).

Ces résultats furent appréciés numériquement après exploitation des données obtenues par le test de traction représentées par les valeurs des taux de déformation, de contrainte et le module de Young qui caractérisent le comportement de chaque plaque après être soumise à une sollicitation mécanique.

Enfin, le test de densité nous donne une quantification sur le gain en légèreté obtenu après introduction de la fibre végétale dans la matrice de PSV permettant ainsi de confirmer l'avantage d'utiliser un tel type de ressource naturelle dans le processus de fabrication de matériaux composites.

Les résultats obtenus des différentes expériences de caractérisations effectuées indiquent toutes une amélioration des propriétés mécaniques du matériau vierge après introduction des

Conclusion et perspectives

feuilles de Luffa comme renfort à l'intérieur de la matrice, ceci avec une amélioration de ces dites propriétés dans le cas de l'utilisation du traitement au NaOH à 5% vis-à-vis du traitement au KMnO₄ 0.02%, d'autre part, en prenant en considération le facteur de variation du taux de fibres, nous avons relevés l'amélioration du comportement du composite en passant d'un taux inférieur à 10 % vers un taux aux alentours de (12-13)% suivie d'une légère déclinaison de des valeurs des propriétés mécanique lorsque le TDF est au-delà des 13%, ce qui nous conduit à favoriser les plaques réalisées avec un taux aux alentours de (12-13)% de fibres végétales.

Perspectives

Comme mentionné précédemment, ce travail est loin d'être une recherche exhaustive et complète sur toute les possibilités et capacités d'utilisation de la fibre du Luffa, ou toute autre fibre d'origine végétale. Ainsi en offrant les résultats obtenus par la présente étude ainsi que la presse thermique construite afin de réaliser les matériaux conçus pour ce projet, il serait intéressants de pouvoir fabriquer un nombre plus importants de plaques de composites en variant le taux de fibres sur un intervalle plus important et suivre le comportement du matériau obtenu. D'autres part, l'utilisation combiné de deux types de fibres végétales dans pour la fabrication d'un même composite pourrait offrir des résultats plus probants permettant par exemple de compenser certains des défauts des fibres de Luffa causé par l'irrégularité de sa structure morphologique et obtenir ainsi un matériau plus résistant aux efforts mécaniques

Bibliographie

Bibliographie :

Bibliographie

1. Tapia, C., Paredes, C., Simbaña, A., & Bermúdez, J. (2006). Aplicación de las Fibras Naturales en el Desarrollo de Materiales Compuestos y como Biomasa. Revista Tecnológica-ESPOL, 19(1).
2. Rahhali A Valorización de residuos queratínicos para la obtención De materiales biocompuestos. 232
3. DAMOUS H (2021) Développement d'un Biomatérial à Base de Polymère et Renfort Végétale. Mémoire de projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique
4. Amira B, BENBABAALI S (2020) Elaboration et caractérisation de composites renforcés par des fibres ligno-cellulosiques. Mémoire de projet de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique
5. Balestra C (2012) MATERIALI BIOCOMPOSITI IN ARCHITETTURA. Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura, Università degli Studi di Napoli "Federico II"
6. Tahrat I, Kacimi J (2021) Etude des propriétés d'un nouveau matériau à base d'une matrice polymère renforcée par des fibres végétales. 94
8. Marc Marzano, Pascal Celle, Action Composite Les matériaux composite
9. Traore B Elaboration et caractérisation d'une structure composite (sable et déchets plastiques recyclés): Amélioration de la résistance par des charges en argiles. 213
10. Allagui S Développement et caractérisation d'un composite biosourcé instrumenté et recyclable. 186
12. Tossou E Développement de nouveaux composites hybrides renforcés par des fibres de carbone et de lin: mise en oeuvre et caractérisation mécanique. 232
13. Maxime BOULANGHIEN (2014) Formulations de composites thermoplastiques à partir de fibres de carbone recyclées par vapo-thermolyse. DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, Ecole Nationale Supérieure des Mines d'Albi-Carmaux conjointement avec l'INP Toulouse
14. Yann Lebaupin (2016) Comportement à l'impact et post-impact d'un composite lin/Polyamide 11 élaboré par thermocompression. Doctorat, L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE MECANIQUE ET D'AEROTECHNIQUE
15. Ruotolo G VEGETALI APPLICATE AL MIGLIORAMENTO DELLA LIGNINA E DELLA CELLULOSA NELLE PIANTE DA. 113
16. HARRACHE Rabia (2015) Elaboration et Caractérisation des composites à Matrcie Polymère et à Renforts végétal et Nanométrique Lamellaire. Memoire en vue de l'obtention du diplôme de magister, Université Ferhat Abbas Sétif -1-
18. Gourier C (2016) Contribution à l'étude de matériaux biocomposites à matrice thermoplastique polyamide-11 et renforcés par des fibres de lin. 323

Bibliographie :

19. Tanobe V, Flores-Sahagun T, Amico S, Muniz G, Satyanarayana K (2014) Sponge Gourd (*Luffa Cylindrica*) Reinforced Polyester Composites: Preparation and Properties. *Def Sci J* 64:273–280. <https://doi.org/10.14429/dsj.64.7327>
20. Thinhinane A, Chahinaz A, Hammiche D, Klaai L Elaboration et caractérisation d'un composite à base de polyéthylène chargé d'une fibre végétale. 57
22. Paglicawan MA, Cabillon MS, Cerbito RP, Santos EO (2005) Loofah Fiber as Reinforcement Material for Composite. 134:8
23. AMISHA KUMARI, NEETHU N, PALAPARTHI ALEKHYA, SHALINI SINGH, JUREDDY CHINMAI SAI (2017) Chemistry project POLYESTER
25. Nadia mehdi (2015) Modificaiton chimique du POLYSTYRENE PAR LA PYRIDINE MOYENNANT UNE VOIE HOMOLYTIQUE. 131
26. Pr. Noureddine CHAREF La résonance magnétique nucléaire (RMN) Cours et TD. In: *Physicochimie des Macromolécules Biologiques Master I Immunologie*. p 14
27. Lydia BOULKROUNE, CHEKKAL Ibtissem (2019) Valorisation de la biomasse locale dans l'élaboration de nouveaux matériaux composites. EN°P
28. Daniel K. Schneider, Matbgn, Quentin Gyger et al Découpe et gravure laser Une introduction
29. Belouadah Z, Rokbi M, Ati A (2022) Manufacturing and Characterization of New Composite Based on Epoxy Resin and *Lygeum Spartum L.* Plant. *J Nat Fibers* 19:4236–4248. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1856273>
30. Belouadah Z, Toubal L, Belhaneche-Bensemra N, Ati A (2021) Characterization of ligno-cellulosic fiber extracted from *Atriplex halimus L.* plant. *Int J Biol Macromol* 168:806–815. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.142>
31. Belouadah Z, Ati A, Rokbi M (2015) Characterization of new natural cellulosic fiber from *Lygeum spartum L.* *Carbohydr Polym* 134:429–437. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.024>