

République algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement  
Technologique-Skikda



Département de Technologie  
Filière : Génie Mécanique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'enseignement du secondaire

### Option

Génie mécanique

### Thème

# Effet des paramètres de coupe sur le facteur de délamination en perçage des biocomposites

Présenté par : -Chérifi Fadoua  
-Benfiala Chaima

Sous la direction du Dr. Saaidia Aziz

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Etablissement	Rôle
Issasfa Brahim	MCB	ENSET- Skikda	Président
Ladaci Naouri	MCB	ENSET- Skikda	Examineur
Saaidia Aziz	MCA	ENSET- Skikda	Encadreur

Année Universitaire : 2023/2024

# Remerciements

*Tout d'abord, je remercie Allah tout-puissant de nous avoir accordé le succès dans la réalisation de ce travail.*

*Je remercie mes honorables parents et ma chère sœur « Amel », je remercie tous mes professeurs de l'école supérieure.*

*Je remercie mes amis qui m'ont réuni pendant la résidence universitaire « Salma, Chaima, Karima, Assema, Dr Hayet, Hadil » et toutes les belles âmes que j'ai rencontrées, et je remercie également mon professeur et ma chère sœur Nemli Ratiba, et je remercie mon cher ami « Bilal ».*

*Je remercie chef département de technologie « Saleh Rahmouni », et bien je n'oublierai pas la gentillesse que chère grand-mère, et je lui souhaite un prompt rétablissement.*

*Et je remercie ma chère Chérifi Fadoua qui m'a soutenu dans la réalisation de ce travail.*

*Louange à Allah pour l'achèvement et la bonne fin.*

*Benfiata Chaima .*

# REMERCIEMENTS

Par Sa grâce infinie, j'ai achevé mon parcours académique avec un immense sentiment de gratitude et d'accomplissement. Ce voyage n'aurait pu être possible sans Son soutien indéfectible et Sa miséricorde constante.

Je remercie Dieu d'avoir guidé mes pas et d'avoir illuminé mon chemin tout au long de ces années d'études. Je suis reconnaissant pour les connaissances acquises, les compétences développées et les expériences enrichissantes qui ont jalonné ce parcours.

Aujourd'hui, je savoure la joie d'avoir mené à bien mes recherches et de clore ce chapitre de ma vie avec un cœur rempli de reconnaissance.

Je suis conscient que ce n'est que la fin d'un début, et j'entame cette nouvelle étape de ma vie avec ferveur et détermination, guidé par les valeurs et les principes que j'ai acquis grâce à mon éducation.

Je suis infiniment reconnaissant envers tous ceux qui ont contribué à mon succès :

À la lumière de mon existence, l'essence de mon existence et la source de mes réalisations, ma mère bien-aimée Mme «Amari Fayza », une bénédiction divine qui t'accompagne et prolonge ta précieuse vie.

À l'esprit de mon défunt père « Chérifi Farouk » qui m'a appris à tenir une plume et à écrire des mots sans regret - que Dieu vous fasse miséricorde

—

À un seul corps, mes proches et mon soutien dans la vie, mes frères et sœurs « Fouad, Chérie Marwa, Radia, Sabrina, Dikra, Malak » et à la première joie de notre famille, ma nièce et mon battement de cœur « Cheikh Elline » et à le mari de ma sœur, qui était le meilleur frère et le meilleur conseiller « Cheikh Alla ».

Et à tous ceux qui m'ont soutenu, et aux mains qui m'ont donné des conseils sincères, d'abondantes bénédictions et beaucoup d'aide, à mon cher oncle « Chérifi Nadhir » et toute la famille « Chérifi ».

À notre cher professeur et notre directeur de thèse « Aziz Saidia » , qui a été notre meilleur soutien et notre meilleur guide dans notre mémoire de fin d'études, et à tous mes professeurs qui ont été la lumière de mon chemin et le fondement de ma réussite.

Au plus proche de moi, toujours et pour toujours «Merghadi A ».

À ceux qui ont abandonné la fraternité et se sont distingués par leur loyauté, à ceux qui m'ont réuni grâce à la connaissance lumineuse et à l'amitié de mes camarades de classe, en particulier IKram, Amel, Chaima, Assma, Feriel, Aya, Hadeel, Wissal, Anfel, Yakine.

À celui qui m'a accompagné et partagé cette recherche, mon collègue « Benfiala Chaima ».

En fin de compte, ô Dieu, fais-en une bonne fin et le début de plus grands chemins.

*Chérifi Fadoua*

## ملخص

الهدف الرئيسي من عملنا هو تطوير وتوصيف مادة مركبة عضوية مدعمة بعناصر ألياف الكتان والصبان ومعرفة تأثير عوامل القطع وعلاقتها بعامل التصفيح في ثقب المادة المركبة الحيوية. المادة المركبة المستخدمة في دراستنا هي طبقات تم الحصول عليها من طريق راتنجات الايبوكسي وألياف الكتان وألياف الصبان. الطريقة التي اعتمدنا عليها هي القولية الفراغية على مستوى مختبر الجامعة. أما بالنسبة لعملية التثقيب، فقد قمنا بها في لوحين، الأولى مكونة من ألياف الكتان وألياف الصبان، أما الثانية فهي مكونة من ألياف الكتان وألياف السيزال في مصنع إسمنت حجار السود بسكيدة.

## الكلمات المفتاحية

مادة مركبة – الياف – عامل التصفيح – عوامل القطع – راتنجات الايبوكسي

## **Résumé**

L'objectif principal de notre travail est de développer et de caractériser un matériau composite organique renforcé d'éléments de fibres de lin et de cactus et connaître l'effet des facteurs de coupe par rapport à facteur de délaminage dans la perforation du matériau biocomposite.

Le matériau composite utilisé dans notre étude est constitué de couches obtenues à partir de résine époxyde avec des fibres de lin et des fibres de cactus. La méthode sur laquelle nous nous sommes appuyés est le moulage sous vide au niveau du laboratoire universitaire.

Quant au procédé de perforation, nous l'avons réalisé sur deux plaques, la première est composée de fibres de lin et de fibres de cactus, tandis que la seconde est composée de fibres de lin et de fibres de sisal au niveau de la cimenterie Hajjar Al-Soud, Skikda.

Les mots clé :

Matériau composite – Les fibres – Facteur de délamination – Les paramètres de coupe – La résine époxy

## **Summary**

The main objective of our work is to develop and characterize an organic composite material reinforced with flax and cactus fiber elements and study the effect of cutting factors in relation to delamination factor in the perforation of the biocomposite material.

The composite material used in our study is layers obtained from epoxy resin, flax fibers and cactus fibers. The method we relied on is vacuum molding at the university laboratory level.

As for the perforation process, we carried it out on two plates, the first is composed of linen fibers and cactus fibers, while the second is composed of linen fibers and sisal fibers at the Hajjar cement factory. Al-Soud, Skikda.

Keywords:

Composite material – The fibers – Delamination factor – Cutting parameters – Epoxy resin

# Sommaire

Remerciements

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction général

## Chapitre I

### Synthés bibliographique

I.1.Introduction .....	1
I.2.Les matériaux composites .....	1
I.3.Les matériaux composites à fibres naturelles .....	1
I.3.1.Les différents types des matériaux composites à fibres naturelles .....	2
I.3.2.Les renforts .....	3
I.3.2.1.Les renforts inorganiques .....	3
I.3.2.2.Les renforts organiques .....	3
I.3.3.Les matrices.....	4
I.3.3.1.Matrice organique .....	4
I.3.3.2.Matrices therm durcissables .....	4
I.3.3.3.Matrice thermoplastique .....	4
I.4.Techniques d'obtention du renfort à fibres végétales .....	5
I.4.1.L'extraction mécanique .....	5
I.4.1.1.Par teillage .....	5
I.4.1.2. Par déflexion .....	5
I.4.1.3. Par laminage .....	6
I.4.1.4. Par explosion à la vapeur .....	6
I.4.1.4.1. Le vapocraquage .....	6
I.4.1.4.2. La décompression explosive .....	6
I.4.2.L'extraction chimique .....	6

I.4.2.1. Procédé Kraft .....	6
I.4.2.2. Procédé au bisulfite .....	7
I.4.2.3. Procédé acide .....	7
I.4.2.4. Procédé Soude-Anthraquinone .....	7
I.4.2.5. Procédé à la soude .....	7
I.4.3.L'extraction biologique .....	8
I.4.3.1. Le rouissage à terre .....	8
I.4.3.2. Le rouissage à l'eau .....	8
I.4.3.3. Par action microbienne (enzymatique) .....	9
I.4.4.L'extraction combinée .....	9
I.5.Techniques de mise en œuvre des matériaux composites à fibres végétales .....	9
I.5.1. Le moulage par transfert de résine (RTM).....	9
I.5.2.Le moulage par compression à froid .....	10
I.5.3.Le moulage par compression à chaud .....	10
I.5.4.Le moulage par contact .....	10
I.5.5.Le moulage sous vide .....	11
I.5.6.Le moulage par projection simultanée .....	11
I.6.Propriétés des matériaux composites à fibres végétales .....	12
I.6.1.Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales .....	12
I.6.2.Caractéristiques chimiques des fibres végétales .....	13
I.6.3.Caractéristiques thermiques .....	14
I.7.Usinage des matériaux composites à fibres végétales .....	14
I.7.1.Fraisage des matériaux composites à fibres végétales .....	15
I.7.2.Perçage des matériaux composites à fibres végétales .....	16
I.8.Les composites à fibres naturelles dans l'industrie .....	18
I.8.1. En automobile .....	18
I.8.2. En construction .....	18
I.8.3. Autres applications .....	18
I.9.Conclusion .....	18

## Chapitre II

### Etude expérimentale

II.1.Introduction .....	19
II.2 Matériaux de l'étude et matériels utilisés .....	19
II.2.1.Matières premières pour la préparation des plaques .....	19
II.2.1.1.La résine époxy .....	19
II.2.1.2.Propriétés de la résine époxy .....	20
II.2.1.3.Les fibres végétales utilisées .....	20
II.2.2.Préparation des tôles de renfort .....	21
II.2.3. Caractéristiques de tapis de fibres utilisé dans notre étude .....	22
II.2.4.Préparation du matériau composite .....	22
II.2.4.1.Préparation de la surface .....	22
II.2.4.1.Moulage par stratification .....	22
II.2.3.Description de la machine .....	24
II.2.4.Description de l'outillage .....	25
II.3.Techniques et protocole d'essai .....	26
II.3.1 .Description et choix des opérations de coupe .....	26
II.3.2.Observation des défauts d'usinage .....	28
II.3.3.Calcul de facteur de délaminage matériau 1 .....	31
II.3.4.Calcul de facteur de délaminage matériau 2 .....	32

## Chapitre III

### Résultat et discussion

III.1.Introduction .....	33
III.2. Analyse et discussion.....	33
III.3.Conclusion.....	41
Conclusion générale	
Références	

## Liste des figures :

Figure 1. Classification des fibres naturelles suivant leur origines.

Figure 2. Le moulage par transfert de résine RTM.

Figure 3. Le principe de moulage par compression à froid.

Figure 4. Moulage par contact.

Figure 5. Le moulage sous vide.

Figure 6. Le moulage par projection simultanée.

Figure 7. Fraiseuse numérique à 3 axes.

Figure 8. Les opérations de fraisage.

Figure 9. l'opération de perçage.

Figure 10. Certains dommages résultant du processus de perçage.

Figure 11. MEDAPOXY STR EA.

Figure 12. MEDAPOXY STR EB.

Figure 13. Les fibres de lin.

Figure 14. Les fibres de cactus.

Figure 15. Surface de travail.

Figure 16. Préparation du matériau composite.

Figure 17. La forme finale du matériau composite.

Figure 18. Traçage des plaques.

Figure 19. Fraiseuse traditionnelle.

Figure 20. Les outils de perçage.

Figure 21. Les échantillons après le perçage.

Figure 22. Matériau 1.

Figure 23. Matériau 2.

Figure 24. Influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas  $D=5\text{mm}$  et  $N=315\text{ tr/min}$ .

Figure 25. Influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas  $D=5\text{mm}$  et  $N=1000\text{tr/min}$ .

Figure 26. influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas  $D=5\text{mm}$  et  $N=1600\text{ tr/min}$ .

Figure 27. influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas  $D=7\text{mm}$  et  $N=315\text{ tr/min}$ .

Figure 28. influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas  $D=7\text{mm}$  et  $N=1000\text{ tr/min}$ .

Figure 29. influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas  $D=7\text{mm}$  et  $N=1600\text{ tr/min}$ .

Figure 30. influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas  $D=10\text{mm}$  et  $N=315\text{ tr/min}$ .

Figure 31. influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas  $D=10\text{mm}$  et  $N=1000\text{ tr/min}$ .

Figure 32. influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas  $D=10\text{mm}$  et  $N=1600\text{ tr/min}$ .

**Les tableaux :**

Tableau1. Consommation de bioplastiques dans l'union européenne en 2009.

Tableau2. Les caractéristiques mécaniques de quelques fibres végétales.

Tableau 3. Composition chimique de certaines fibres végétales.

Tableau 4. Les diamètres des outils.

Tableau 5. Paramètres de coupe.

Tableau 6. Les diamètres de délaminage (matériau1).

Tableau 7. Les diamètres de délaminage (matériau2).

Tableau 8. Facteur de délaminage de matériau1.

Tableau 9. Facteur de délaminage de matériau2.

## Introduction général

Les matériaux composites ont des performances mécaniques très élevées et qui peuvent être adaptés au cahier des charges du concepteur afin d'obtenir les propriétés souhaitées en sélectionnant les bons constituants. En conséquence, l'option de personnalisation. L'approche du dimensionnement structurel souvent utilisée pour les matériaux traditionnels est considérablement modifiée par les matériaux composites.

Aujourd'hui, les matériaux composites se développent un peu partout et sont à l'origine d'énormes progrès dans de nombreuses réalisations de haute technologie. De nos jours, de plus en plus de secteurs industriels, y compris ceux de la construction, utilisent des matériaux composites pour créer des pièces structurelles de différentes tailles.

En raison de leur avantage supérieur en termes de rapport résistance/poids, les matériaux composites sont généralement préférés aux matériaux conventionnels. Cependant, l'usinage des matériaux composites est un défi majeur pour les industries en raison de leur extrême hétérogénéité. Plusieurs opérations d'usinage sont nécessaires lors de la mise en service des composites. Parmi les différentes opérations d'usinage, le perçage est l'opération d'usinage la plus couramment employée pour les stratifiés en composites polymères en raison de la nécessité d'assembler les structures. Les travaux sur les composites commerciaux ont permis d'identifier de nombreux paramètres pendant l'opération de perçage qui peuvent influencer les facteurs de perçage et l'endommagement du matériau. En particulier, l'influence des paramètres d'usinage, de la géométrie de l'outil, des matériaux de l'outil et des types d'outils sur la génération de l'effort de coupe et les mécanismes de délaminage.

Dans ce contexte, ce travail se focalise sur l'étude des performances du procédé de perçage. Ce dernier est appliqué sur des différents types de matériaux bio-composites. Deux types de plaques biocomposites avec un renfort végétal et une matrice époxyde ont été utilisées.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Chapitre I : une étude bibliographique sur les biocomposites et ses constituants avec une présentation générale des différents types des fibres naturelles, la structure des fibres végétales, caractéristiques physico-chimique et mécanique, l'extraction et modification des fibres, procédés de mise en forme des composites.

Chapitre II : Cette partie se concentre sur le matériau de l'étude et le protocole d'élaboration des plaques à base de fibre de lin et de cactus avec une résine époxyde, ainsi que les essais à réaliser.

Chapitre III : comprend l'interprétation des résultats obtenus des essais expérimentaux

Et enfin, le travail termine par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Synthèse bibliographique**

## **I.1.Introduction**

La recherche de matériaux aux propriétés améliorées a poussé les humains à développer des matériaux composites depuis l'Antiquité. La nature a été une riche source d'inspiration, fournissant des exemples comme l'os, une structure rigide mais légère composée de fibres de collagène intégrées dans une matrice minérale dure et cassante d'apatite, et le bois, un matériau flexible mais solide formé par un réseau de micro fibrilles de cellulose. Cimenté dans une matrice d'hémicellulose et de lignine [1,2]. Depuis leur apparition dans les années 1940, les composites renforcés de fibres ont connu un développement remarquable en raison de leur combinaison exceptionnelle de propriétés mécaniques et de faible densité. Leur rapport qualité-prix favorable les a propulsés dans un large éventail d'applications dans divers secteurs, notamment l'aérospatiale, l'automobile, la marine, le ferroviaire, la construction, la décoration et la construction et bien d'autres encore [3]. Malgré les avancées prometteuses des matériaux composites, de nombreux défis demeurent, notamment ceux liés à l'impact environnemental, à la santé et à la sécurité. Les matériaux composites traditionnels, tels que le verre, l'aramide et la fibre de carbone, posent des problèmes majeurs en matière de fin de vie. Pour répondre à ces problèmes, les fibres naturelles sont apparues comme une alternative pratique. Les fibres naturelles dérivées de ressources renouvelables offrent une biodégradabilité, une irritation cutanée et respiratoire réduite et une densité inférieure à celle des fibres minérales. [4,5] Les fibres végétales offrent des avantages incontestables, notamment un faible coût et des propriétés mécaniques exceptionnelles, telles qu'une résistance et une rigidité élevées. Cependant, leur sensibilité à l'absorption d'humidité et leur résistance thermique limitée peuvent entraver leur utilisation généralisée [6].

## **I.2.Les matériaux composites**

Les matériaux composites sont des matériaux hybrides qui combinent les propriétés de deux matériaux de base différents. La matrice et les fibres sont les deux composants principaux des composites. La matrice est le matériau de base qui sert de support aux fibres, tandis que les fibres sont les éléments résistants qui sont répartis dans la matrice [7].

## **I.3.Les matériaux composites à fibres naturelles**

L'utilisation de fibres naturelles dans les composites est en plein essor dans le domaine de l'ingénierie des matériaux. Cette tendance est due à l'augmentation de la demande de biomatériaux et au désir de remplacer les fibres synthétiques (comme le verre, le carbone et l'aramide) par des fibres naturelles durables.

Les fibres naturelles présentent de nombreux avantages par rapport aux fibres synthétiques. Elles sont plus légères, ont une résistance spécifique et une rigidité plus élevées, et sont issues de ressources renouvelables. De plus, elles sont plus faciles à transformer et leur fabrication est moins dangereuse.

L'utilisation de fibres naturelles dans les composites permet de réduire la dépendance au pétrole dans la fabrication de ces matériaux. Elle contribue également à la protection d'environnement, car les fibres naturelles sont biodégradables [8].

Grâce à leurs propriétés uniques et à leur large d'applications, la demande de composites à renfort naturel en augmentation. Les pays de L'UE utilisent de plus en plus de matières premières végétales pour la production de composites à fibres naturelles(CFN).

Le tableau "1" fournit des estimations de la consommation de ces matériaux pour différents méthodes de mise œuvre et pour différents secteurs dans l'Union européenne [9].

**Tableau.I.1.** Consommation de bioplastiques dans l'union européenne en 2009 [9].

<b>Composites à renfort naturels</b>	<b>Consommation (t)</b>
CFN pour usage permanent	>60.000
CFN moulage par compression dans l'industrie automobile	>40.000
Moulage par compression de fibres de coton	>100.000
Moulage par injection et extrusion de fibres de bois (construction, meubles, automobiles)	>120.000
Moulage par injection et extrusion de fibres Naturelles	>5.000
Moulage par compression de fibres de bois dans l'industrie automobile	>50.000
Total des produits en CFN	>450.000

### **I.3.1.Les différents types des matériaux composites à fibres naturelles**

Les fibres naturelles peuvent être classées en trois catégories selon leur origine : végétale, animale ou minérale (Voir Figure I.1).

Les fibres végétales, omniprésentes dans les applications industrielles, proviennent de diverses parties des plantes : graines, tiges, feuilles et fruits. On les distingue en quatre catégories selon leur origine (Voir Figure I.1). [10]

- Fibres extraites de graines.
- Fibres libériennes provenant des tiges.
- Fibres extraites des feuilles.
- Fibres extraites de fruits.

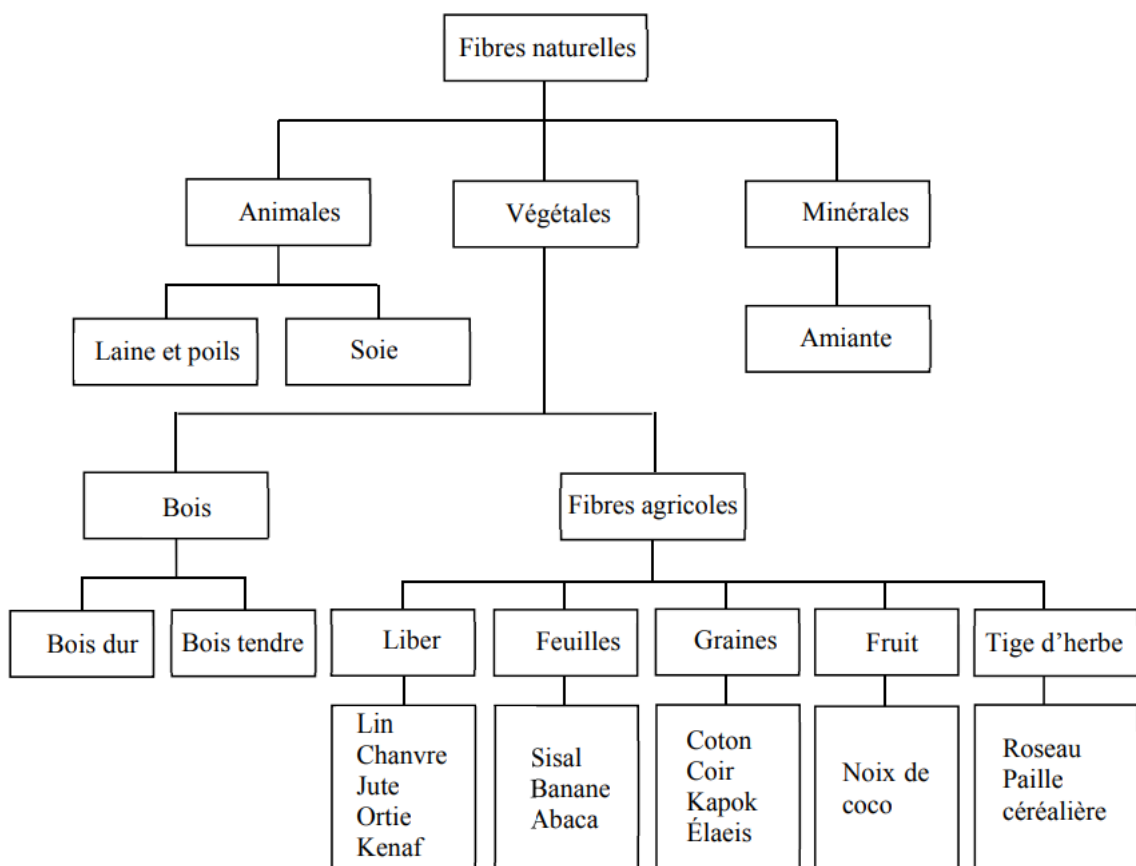


Figure I.1. Classification des fibres naturelles suivant leurs origines [11].

### I.3.2. Les renforts

Les os du matériau composite sont appelés renforts. Ils lui donnent sa structure et ses caractéristiques mécaniques. Ils sont les composants qui donnent aux matériaux composites leurs caractéristiques mécaniques. Ils sont généralement composés de fibres, qui peuvent provenir de divers matériaux [12]. Les renforts filamentaires (des fibres organiques ou inorganiques) améliorent la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites [13]. Selon leur origine, Ils peuvent être classés en deux catégories :

### **I.3.2.1. Les renforts inorganiques**

Qui sont constitués de matériaux non organiques, tels que : Les fibres minérales naturelles comme le mica, les fibres synthétiques comme le verre et les fibres métalliques comme le bore.

### **I.3.2.2. Les renforts organiques**

Qui sont constitués de matériaux organiques, tels que : Les fibres naturelles d'origine animale, comme la laine et la soie, les fibres naturelles d'origine végétale, comme le lin et le coton et les fibres polymériques, comme le kevlar, les polyesters et les aramides. [14]

Dans les renforts organiques les fibres naturelles sont des renforts de matériaux composites qui offrent des avantages économiques et environnementaux. Ils créent également un avenir plus durable. Il est courant d'utiliser des fibres végétales pour renforcer les matériaux composites. Il est facilement accessible car il provient de plantes. Sa structure complexe ressemble à celle d'un matériau composite, tandis que les fibres de cellulose disposées en spirale lui confèrent des qualités mécaniques exceptionnelles.

Bien qu'elles ne soient pas encore couramment utilisées dans les composites, les soies animales présentent des propriétés mécaniques fascinantes. Étant donné qu'elles ont un allongement à rupture très important, elles peuvent s'étendre beaucoup avant de se rompre. De plus, elles ont une capacité d'absorption d'énergie mécanique élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent absorber de l'énergie sans se rompre.

Les biocomposites sont transformés de la même manière que les composites à base de fibres de synthèse. Cependant, il est important de manipuler les fibres naturelles avec précaution pour ne pas les endommager. La température de dégradation des fibres naturelles est généralement comprise entre 200 et 230 °C, mais la durée d'exposition à cette température est également [15]

### **I.3.3. Les matrices**

Les matrices sont des matériaux composites constitués d'un élément de base, appelé matrice, et d'un ou plusieurs renforts. Les matrices peuvent être minérales ou organiques [16].

### **I.3.3.1. Matrice organique**

Les matrices organiques sont les matrices les plus utilisées dans l'industrie composite en raison de leur facilité de mise en œuvre et de leur faible coût de production. Il existe deux principaux types sont les thermoplastiques et les thermodurcissable [17].

### **I.3.3.2. Matrices thermodurcissables**

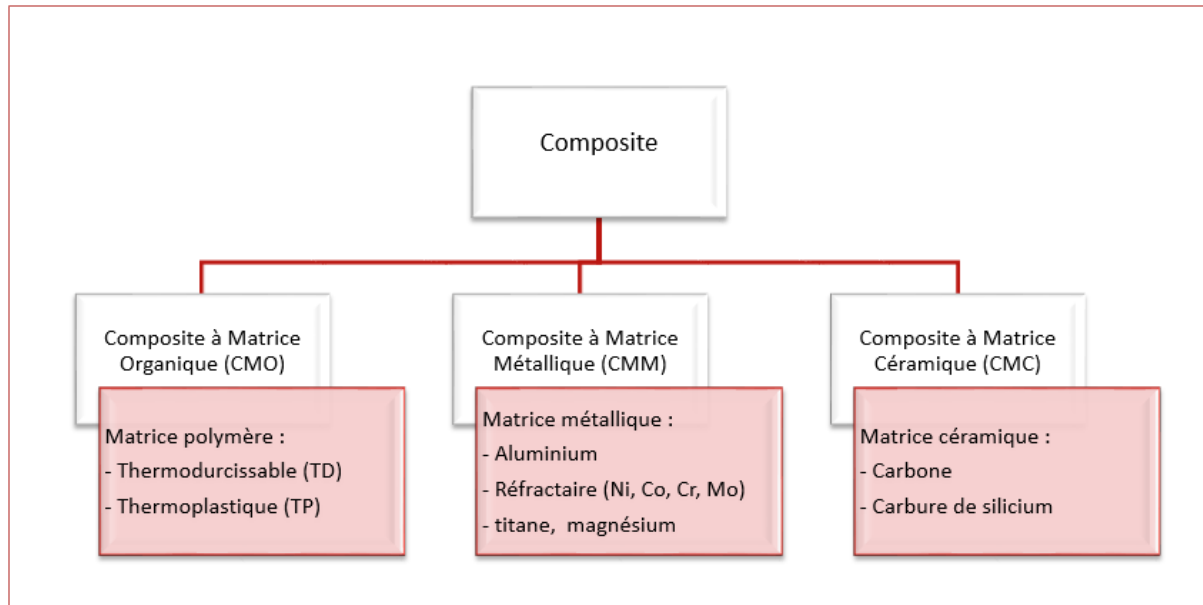
Les principales résines thermoplastiques sont le polyester et l'époxy. Le polyester est le plus utilisé, représentant environ 70 % du marché. Viennent ensuite les époxy avec environ 25 % du marché, et d'autres résines thermodurcies sont également utilisées, comme les résines phénoliques, les polyuréthanes ou les polyimides. Ces matrices se présentent sous forme d'une résine initialement à l'état de liquide visqueux, Ce liquide est composé de longues molécules qui sont liées les unes aux autres par des liaisons chimiques. Lorsque la résine est chauffée et mélangée à un durcisseur, ces liaisons se renforcent et forment une structure solide tridimensionnelle. Cette structure est irréversible et ne peut pas être décomposée en molécules individuelles [17].

### **I.3.3.3. Matrice thermoplastique**

Les composites à matrice thermoplastiques sont de plus utilisés dans l'aéronautique, car ils présentent de nombreux avantages par rapport aux composites à matrice thermodurcissable [17]. Et ils présentent une résistance accrue aux chocs et aux dommages, ce qui le rend plus sûr et plus durable. Les composites thermoplastiques présentent de nombreux avantages, notamment une meilleure tenue au choc, une bonne résistance à l'endommagement et une possibilité de recyclage véritable. Cependant, leur développement est actuellement limité par des problèmes de procédés, notamment une cadence de production et des coûts élevés.

La principale cause de ces problèmes est la viscosité élevée des polymères thermoplastiques à l'état fondu. En effet, une viscosité élevée rend difficile l'imprégnation des tissus, en particulier lorsque la fraction volumique de fibre est élevée.

Les progrès réalisés dans ces domaines devraient permettre de surmonter les obstacles actuels et de favoriser le développement des composites thermoplastiques [17].



**Figure I.2.** Les trois grandes familles de matrice [16].

#### **I.4. Techniques d'obtention du renfort à fibres végétales**

L'extraction des fibres végétales consiste à séparer les fibres des tiges récoltées. Cette opération peut être réalisée par des méthodes mécaniques, biologiques, chimiques ou une combinaison de ces trois méthodes [18].

##### **I.4.1. L'extraction mécanique**

L'extraction mécanique des fibres végétales est un processus qui consiste à séparer les fibres des autres composants de la tige par des moyens mécaniques. Cette méthode est utilisée depuis l'Antiquité pour la production de textiles, de cordages et d'autres produits à base de fibres [18].

##### **I.4.1.1. Par teillage**

L'ouverture des faisceaux de fibres est une étape importante du processus d'extraction mécanique des fibres végétales. Elle consiste à séparer les fibres du corps de la tige, en brisant le cœur de la tige en petits morceaux. Cette action permet de rompre l'adhésion entre les fibres et de les séparer du corps de la tige. Deux méthodes principales sont utilisées pour cet effet : les rouleaux tournants et les broyeurs à marteau [19, 20].

##### **I.4.1.2. Par déflexion**

L'extraction des fibres végétales est réalisée par des machines appelées "raspadors" (grattoir en langue espagnole). Ces machines râpent les feuilles des plantes, ce qui rompt l'adhésion entre les fibres et le corps de la plante. Les fibres libérées peuvent ensuite être collectées. Elles sont constituées d'un axe rotatif entraîné par un moteur. Sur cet axe, des supports maintiennent des batteurs en acier.

Les tiges sont introduites dans la machine par l'un de ses côtés. Elles sont ensuite prises entre les batteurs en acier et une table à ciseaux. Les batteurs râpent les tiges, ce qui rompt l'adhésion entre les fibres et le corps de la plante. Les fibres sont ensuite libérées et guidées vers l'autre côté de la machine [21].

#### **I.4.1.3. Par laminage**

L'extraction des fibres végétales se fait en plusieurs étapes. La première étape consiste à découper les tiges en morceaux. La deuxième étape consiste à écraser les morceaux sous presse ou par laminage. La troisième étape consiste à combiner les deux traitements précédents. Cette opération est répétée plusieurs fois de suite jusqu'à ce que les fibres soient le plus possible séparées [22].

#### **I.4.1.4. Par explosion à la vapeur**

L'explosion à la vapeur, également appelée "explosion à la vapeur" en anglais, est un processus thermo mécano-chimique qui déstructure la matière lignocellulosique en combinant la chaleur produite par la vapeur, les hydrolyses provoquées par la formation d'acides organiques et le cisaillement provoqué par une baisse soudaine de la pression [23].

Le procédé se déroule en deux étapes :

##### **I.4.1.4. 1. Le vapocraquage**

Cette 1ère étape du procédé consiste à faire diffuser la vapeur sous haute pression à l'intérieur du matériau. Lorsque la vapeur se condense, elle libère de la chaleur. Cette chaleur provoque l'hydrolyse des groupements acétylés et méthylglucuroniques présents dans les xylanes et certaines fractions de galactomannanes. La dépolymérisation de la lignine est catalysée par les acides organiques libérés. Ces acides augmentent l'acidité du milieu, ce qui déstabilise les liaisons entre les molécules de lignine [24].

##### **I.4.1.4. 2. La décompression explosive**

La deuxième étape du processus consiste à réduire rapidement la pression. Une partie de l'eau présente dans le matériau se vaporise en raison de cette baisse de pression. L'expansion rapide de la vapeur d'eau produit des forces de cisaillement suffisantes pour provoquer un éclatement mécanique du matériau. Les propriétés physiques du matériau sont modifiées par l'action combinée de la vapeur d'eau et de la chaleur, l'hydrolyse des hémicelluloses est améliorée et la structure de la lignine est modifiée. L'extraction de la lignine et des hémicelluloses est facilitée par ces modifications [25].

#### **I.4.2. L'extraction chimique**

La littérature décrit plusieurs méthodes de séparation chimique de la cellulose des autres composants non cellulosiques. Ces méthodes présentent plusieurs avantages par rapport à l'extraction mécanique, notamment une meilleure efficacité, une réduction de la consommation d'énergie et un gain de temps. Les processus chimiques de rouissage présentent plusieurs avantages par rapport au rouissage à l'eau à terre. Ils produisent des fibres de qualité constante, quelles que soient les conditions climatiques, et ils sont généralement plus rapides [18]. Les fibres peuvent subir de nombreux traitements chimiques, dont le choix dépend de leur type, du processus de rouissage utilisé et des applications finales prévues. [24, 26, 27].

#### **I.4.2.1. Procédé Kraft**

Ce procédé alcalin utilise une solution de soude (NaOH) et de sulfite de sodium (Na<sub>2</sub>S) pour éliminer la lignine, les pectines et les hémicelluloses des fibres. Le sulfite de sodium est un réducteur, ce qui signifie qu'il peut capter les radicaux libres et empêcher la cellulose de s'oxyder. La cuisson se déroule à une température comprise entre 170 et 175 degrés Celsius pendant 2 à 4 heures. Au cours de cette étape, le sulfure de sodium est hydrolysé en soude, en hydrosulfure de sodium et en sulfure d'hydrogène. Les composés soufrés réagissent avec la lignine pour la transformer en Thio lignines, qui sont plus solubles dans l'eau. La soude joue également un rôle de délignification, en attaquant les liaisons entre la lignine et les autres composants des fibres. La liqueur blanche est la solution chimique appliquée au matériau à délignifier. La liqueur noire est la solution chimique extraite du réacteur, qui contient les composés éliminés de la paroi du matériau [24, 28].

#### **I.4.2.2. Procédé au bisulfite**

En utilisant divers sels de l'acide sulfureux, le procédé au bisulfite permet de séparer la lignine des fibres de cellulose. Les sels utilisés dans le processus de réduction sont des sulfites (SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) Ou des bisulfites (HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en fonction du Ph. Il est basé sur la réaction de l'hydrogénosulfite de calcium, de sodium, d'ammonium ou de magnésium avec de l'anhydride sulfureux libre dans la lignine. L'anhydride sulfureux est préparé par combustion du soufre en présence d'un excès d'oxygène. L'anhydride sulfureux réagit directement avec l'eau pour former du bisulfite. La plage de pH utilisée pour le procédé au bisulfite est comprise entre 1,5 et 5. La durée du traitement varie de 4 à 14 heures, et la température de 130 à 160 °C. Ces paramètres dépendent du type de base utilisé. [24].

#### **I.4.2.3. Procédé acide**

Les composants non cellulosiques sont éliminés par traitement acide. L'acide sulfurique convertit la lignine en acide liginosulfonique soluble, tandis que l'acide chlorhydrique, en présence de chlorures, forme de la chlorolignine soluble dans l'hydroxyde de sodium [24].

#### **I.4.2.4. Procédé Soude-Anthraquinone**

Le procédé Soude-Anthraquinone ou Kraft-Anthraquinone est un procédé de fabrication de pâte à papier qui utilise comme catalyseur un composé ionique, l'antraquinone. L'utilisation de l'antraquinone comme catalyseur permet de réduire le temps de cuisson et d'augmenter le rendement en pâte. Les propriétés des pâtes obtenues sont comparables à celles des pâtes kraft. Les pâtes Soude-Anthraquinone ont un indice kappa comparable à celui des pâtes kraft. L'antraquinone est encore plus efficace pour la délignification que la soude seule [18].

#### **I.4.2.5. Procédé à la soude**

Ce processus n'utilise que la soude NaOH pour dissoudre les substances non cellulosiques telles que la lignine, la pectine et l'hémicellulose, ainsi que les divers constituants qui composent la réserve et la paroi extérieure de la tige de plante. Les paramètres du traitement (température, pression, concentration et durée) doivent être adaptés au lot, à l'âge et au type de plante afin de ne pas dégrader les fibres cellulosiques. Le pH de la solution doit être contrôlé et ajusté à environ 7. L'ajout de réducteurs peut aider à prévenir l'oxydation de la cellulose [24,29].

### **I.4.3.L'extraction biologique**

#### **I.4.3.1. Le rouissage à terre**

La pose au sol (au champ) est une technique naturelle qui permet d'extraire les fibres des plantes. Elle consiste à étaler les tiges des plantes sur le sol après la récolte. Le soleil et la pluie agissent sur les tiges, favorisant le développement de micro-organismes qui décomposent les éléments non cellulosiques. Les fibres sont alors libérées des tiges. Ce processus peut durer de 6 à 8 semaines, en fonction des conditions météorologiques [30]. Bien que cette méthode soit efficace, elle présente plusieurs inconvénients liés à sa dépendance totale aux conditions météorologiques. En effet, le moindre écart, qu'il s'agisse d'un excès d'humidité ou d'une sécheresse, peut avoir un impact direct sur la qualité des fibres produites [31].

### I.4.3.2. Le rouissage à l'eau

Le rouissage anaérobie des tiges est un processus de fermentation similaire au rouissage à l'air. La différence est que les tiges sont immergées dans l'eau, ce qui crée un environnement anaérobie. Les bactéries anaérobies se développent dans cet environnement et dégradent les tiges, les rendant plus souples et faciles à séparer des fibres. Une fois que les fibres se sont détachées des tiges sur toute leur longueur, la plante est sortie de l'eau et mise à sécher. Le séchage des fibres permet de les stabiliser et de les rendre plus faciles à travailler [24]. Auparavant, la méthode principale utilisée était le rouissage à l'eau, qui consistait à faire fermenter les polysaccharides de la matrice par des bactéries anaérobies. La formation de rosée a été développée comme nouvelle méthode d'isolement des fibres en raison de la pollution et des coûts élevés du rouissage à l'eau [32].



**Figure I.3.** Rouissage à l'eau de tiges de jute [24].

### I.4.3.3. Par action microbienne (enzymatique)

L'extraction microbiologique est une méthode d'extraction ancienne et largement utilisée. Elle consiste à faire fermenter les polysaccharides de la matrice végétale par des bactéries ou des champignons, ce qui permet de libérer les fibres [33].

### I.4.3.L'extraction combinée

Pour obtenir des fibres de meilleures qualités, ce processus d'extraction est une combinaison de plusieurs techniques d'extraction précédemment mentionnées. Le choix du type d'extraction dépend de plusieurs facteurs, notamment le type de plante et les propriétés souhaitées [20].

### I.5.Techniques de mise en œuvre des matériaux composites à fibres végétales

Les fabricants s'intéressent de plus en plus au renforcement des polymères avec des fibres naturelles afin de réduire globalement l'impact environnemental. Le choix des renforts de ce type n'est pas simple, le terme correspond notamment aux fibres d'origine végétales, et à l'un des modes de mise en forme les plus importants des matériaux composites à renforts végétaux sont le moulage, qui se divise en plusieurs types, dont [34] :

#### I.5.1. Le moulage par transfert de résine (RTM)

Consiste à imprégner un matériau de renfort placé à l'intérieur de résine et ensemble moule et contre-moule très solide et fermé. La résine est fournie soit par vide, soit par injection de résine. Cette méthode peut atteindre le taux de fibres à grande volume, résultant en des pièces aux propriétés mécaniques haut. Ce procédé de formage est adapté à la réalisation de pièces et de formes profondes compliqué [35].

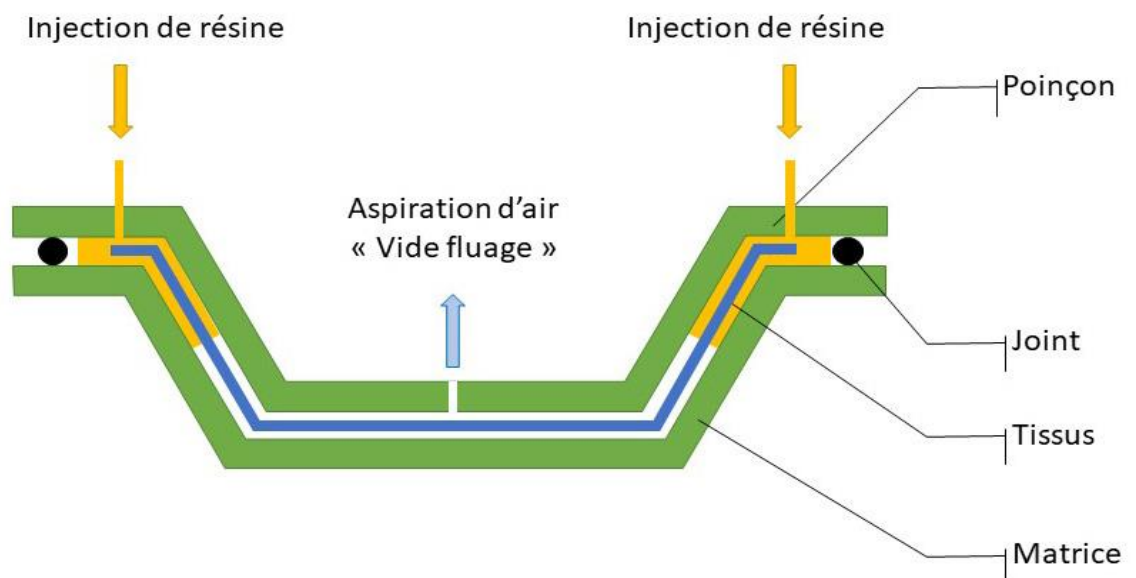


Figure I.4. Le moulage par transfert de résine RTM [35].

### I.5.2. Le moulage par compression à froid

Le moulage ne nécessite pas de chauffage externe du moule et la pression est faible (inférieure à 5 bars). Une fois le moule et le contre-moule préparés, le matériau de renforcement et la matrice sont placés sur le moule, puis l'ensemble moule et contre-moule est fermé par pression, et le moule est progressivement chauffé par la chaleur dégagée par la polymérisation de la résine [36].

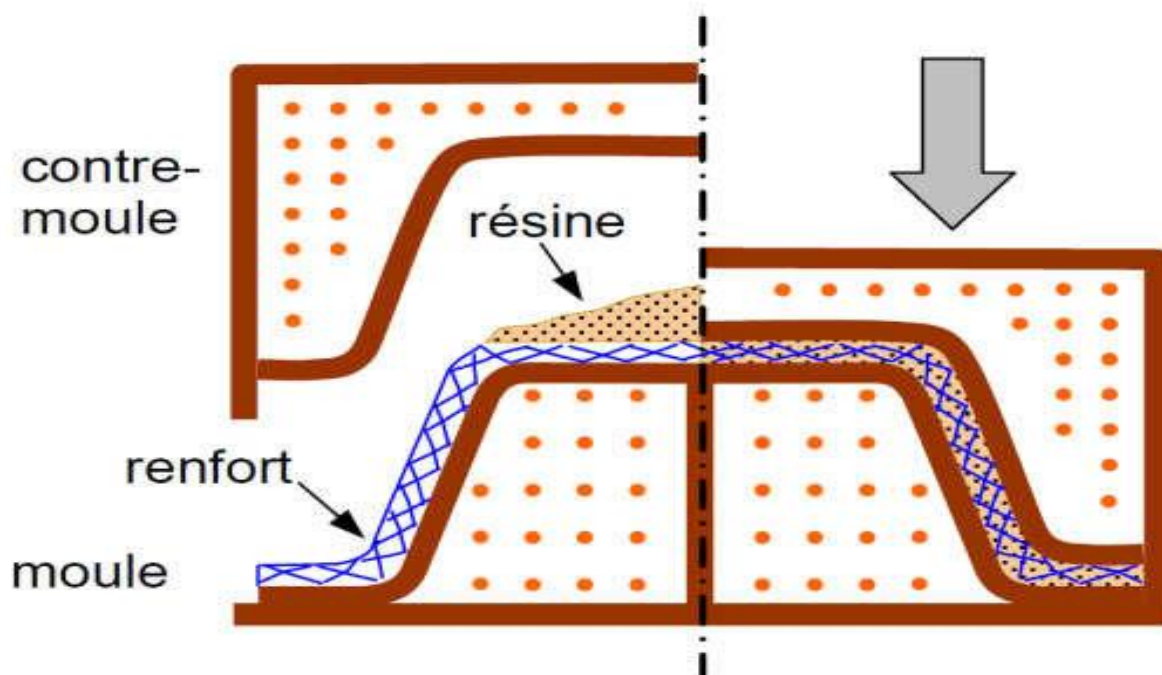


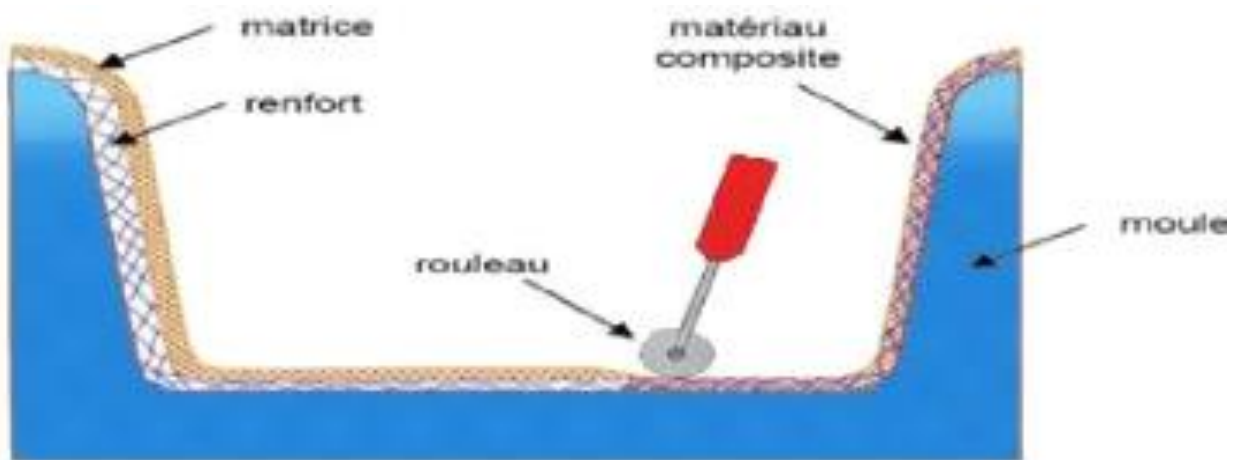
Figure I.5. Le principe de moulage par compression à froid [36].

### I.5.3. Le moulage par compression à chaud

On chauffe le moule à une température comprise entre 80°C et 150°C, puis on utilise un agent démoulant, on met le matériau de renfort et matrice sous forme de poudre, puis on ferme le contre-moule et on applique une certaine pression dessus. La pression varie de 10 à 50 bars. Il faut généralement quelques minutes pour que la pièce durcisse, puis le moule est ouvert et la pièce est retirée [36].

### I.5.4. Le moulage par contact

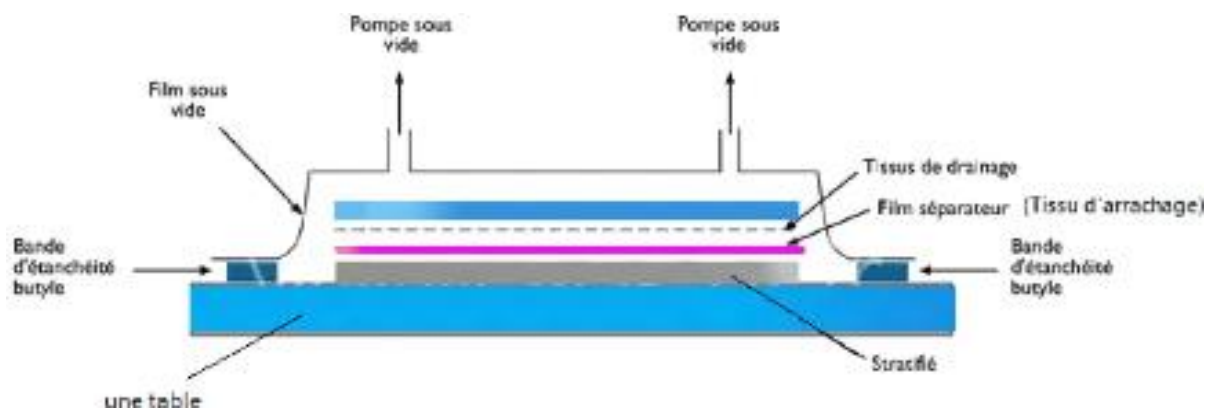
Il s'agit d'une technique permettant de produire des pièces prototypes ou des maquettes. Le principe consiste à imprégner manuellement le matériau de renfort placé dans le moule. Il s'agit d'une technologie coûteuse et lente, mais qui permet de réaliser des pièces de formes complexes [37].



**Figure I.6.** Moulage par contact [37].

### I.5.5. Le moulage sous vide

Cette méthode fonctionne en plaçant à sec le matériau de renfort fibreux sur le film démoulant qui épouse la forme du moule. Le film flexible fait office de contre-moule et assure l'étanchéité. La création du vide permet à la résine de diffuser dans les renforts fibreux et les cavités. Cette méthode peut être combinée à un système de chauffage pour polymériser la résine. Dans les conditions ambiantes, la pression qui fait couler la résine est de 1 atm [38].

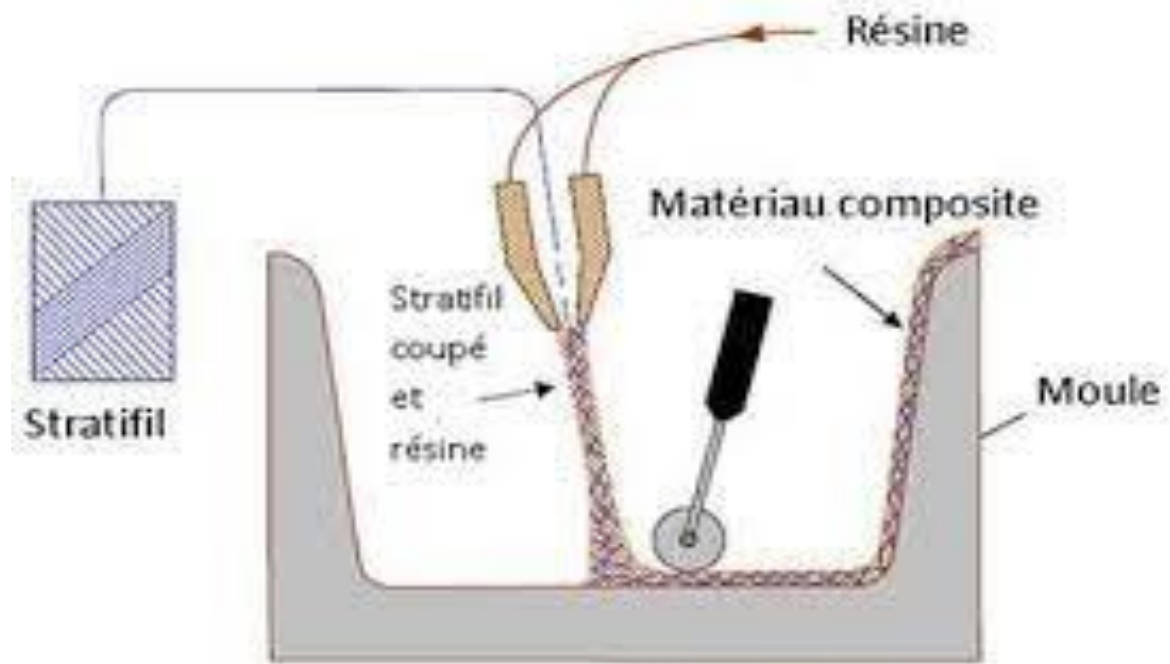


**Figure I.7.** Le moulage sous vide [38].

### I.5.6. Le moulage par projection simultanée

La mise en forme s'effectue en projection simultanément des fibres coupées et de la résine catalysée sur un moule. L'équipement de pulvérisation se compose d'une machine pour couper les stratifiés et d'un pistolet pulvérisateur pour pulvériser la résine et couper les fibres. L'ensemble du processus est actionné par l'air comprimé. La couche de fibres imprégnée de résine est ensuite

compactée et broyée à l'aide de rouleaux ondulés. Le moulage par projection permet d'obtenir une large gamme des pièces à moindre coût [39].



**Figure I.8.** Le moulage par projection simultanée [39].

### I.6. Propriétés des matériaux composites à fibres végétales

Les propriétés des matériaux composites dépendent de nombreux facteurs et elles varient selon les types de ces matériaux, car ces propriétés résultent :

- Caractéristiques, nature et quantité des matériaux constitutifs.
- Des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort.
- De leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort, ect.
- Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :
- Le gain de masse (légèreté).
- Grande résistance à la fatigue.
- Liberté de forme.
- Faible vieillissent sous l'action de l'humidité, de la chaleur et de la corrosion.
- Insensible aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.

- Une bonne isolation électrique.
- Tenue aux impacts et aux chocs très moyenne.
- Très forte anisotropie.

### I.6.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales

Les fibres végétales ont une faible densité et possèdent des propriétés physiques et mécaniques spécifiques intéressantes, parmi lesquelles les suivantes :

- les fibres longues ont des contraintes de traction plus faibles que les fibres courtes, car les premières ont plus de chances de contenir des défauts de formation.
- L'indice de cristallinité élevé de cellulose des fibres témoigne également de ses propriétés mécaniques élevées. La cellulose cristalline a un module élastique allant de 90 à 137GPa, ce qui est relativement plus élevé que celui de certaines autres fibres.
- L'angle des fibres fines explique en partie la déformation élastique des fibres végétales, Ce qui améliore son allongement lorsque la tension est rompue. En effet, les fibres lignocellulosiques subissent une déformation réversible sous l'action de faibles forces de traction, qui est due à l'alignement progressif des microfibrilles de cellulose avec l'axe des fibres et la déformation viscoélastique des polymères amorphes [40].

Le tableau suivant présente les caractéristiques de certaines fibres végétales.

**Tableau I.2.** Les caractéristiques de quelques fibres végétales [40].

<b>Fibre</b>	<b>Densité (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Module de traction (GPa)</b>	<b>Résistance en Traction (MPa)</b>	<b>Allongement (%)</b>
<b>Lin</b>	1.5	28	345-1100	2.7-3.2
<b>Jute</b>	1.45	13-27	350-550	1.2-2.5
<b>Chanvre</b>	1.48	29-70	550-900	1.6-3.5
<b>Ramie</b>	1.5	20-70	550-900	1.6-
<b>Kénaf</b>	1.47	6-8	1580	2.7
<b>Abaca</b>	1.35	20	900	3.5
<b>Sisal</b>	1.45	9-20	400-700	2-14
<b>Coco</b>	1.15	4-6	130-1200	15-40
<b>Coton</b>	1.5	5-12	300-800	3-10

### I.6.2. Caractéristiques chimiques des fibres végétales

Les fibres végétales se caractérisent par leur composition chimique, qui affecte grandement leur durabilité notamment en milieu alcalin. Le tableau suivant présente la composition chimique de quelques fibres végétales [41].

**Tableau I.3.** Composition chimique de certaines fibres végétales [41].

<b>Fibre</b>	<b>Cellulose (%)</b>	<b>Lignine (%)</b>	<b>Hémicellulosos(%)</b>	<b>Pectine (%)</b>	<b>Cendre (%)</b>
Blé	29 – 35	16 – 21	26 – 32	-	-
Coton	94	-	-	1.2	1.2
Alfa	41.9 - 47.6	24.2 - 38.5	11.8 - 24.3	-	1.8 - 5.1
Sisal	47 – 78	7 – 11	24 - 70	10	0.6 - 1
Noix de coco	36 – 46	31 - 45	10	3 – 4	-
Lin	71	2.2	18.6 - 20.6	2.3	-
Jute	41 – 48	21 - 24	18 – 22	-	0.8
Kénaf	37 – 49	15 – 21	18 – 24	-	2 - 4

### I.6.3. Caractéristiques thermiques

L'interaction de l'énergie thermique avec les atomes de la matière détermine certaines de ces propriétés. Ces propriétés sont appelées propriétés thermophysiques et comprennent la capacité thermique, la diffusion thermique et la conductivité thermique [42]. Dans le cas des matériaux composites renforcés de fibres végétales, la stabilité thermique est la plus étudiée, car plusieurs méthodes sont utilisées pour l'analyse thermique des bio-composites, comme la mesure du poids thermique et la détermination du flux thermique, afin de décrire la stabilité thermique de ces composites [43,44], qui la décomposition des fibres lignocellulosiques est contrôlée par la température. Le comportement thermique des fibres végétales dépend des températures de décomposition des polymères des parois cellulaires, et la qualité de l'interface fibre-matrice l'affecte également. Une bonne adhésion à la matrice fibreuse permet la stabilité thermique des composites et peut être améliorée par des traitements chimiques, pour augmenter la résistance mécanique et thermique de ces composites [45]. En général, la température de décomposition des matériaux composites est inférieure à celle des polymères en raison du plus faible degré de décomposition des fibres végétales [43].

### **I.7. Usinage des matériaux composites à fibres végétales**

Les biocomposites renforcés de fibres végétales deviennent une réalité industrielle offre divers avantages en termes de performances économiques, écologiques et mécaniques [46,47]. Ces facteurs incitent les chercheurs et l'industrie à explorer de nouvelles méthodes pour optimiser les processus de fabrication [48,49]. Ainsi, les opérations de finition ce que c'est en réalité très difficile et s'appuie toujours sur des règles empiriques [50,51]. D'une part, cela à la structure complexe à plusieurs échelles des fibres végétales, qui présentent comme la paroi cellulaire des fibres de cellulose. Cristallinité des microfibrilles de la paroi cellulaire, croissance et conditions d'extraction produit d'importants changements dans les propriétés mécaniques des fibres végétales. D'autre part, la structure spéciale renforcée par des fibres végétales, l'intérieur du biocomposite doit être pris en compte car les fibres végétales sont agrégées en multiples faisceaux de microfibrilles. Par conséquent, le processus de découpe comportera quatre étapes différentes [52] :

1. La matrice polymère.
2. L'interface fibre / matrice.
3. Les fibres élémentaires végétales.
4. Les interfaces entre les fibres élémentaires.

Une fraiseuse numérique à 3 axes est employée pour réaliser les opérations d'usinage. La broche de la machine peut se déplacer sur les trois axes (X, Y et Z). La vitesse de rotation et la vitesse

d'avance de la broche sont programmées sur un ordinateur pour garantir une précision optimale des opérations.



**Figure I.9.** Fraiseuse numérique à 3 axes [52].

La plaque d'aluminium est fixée sur la table de la machine où est placé le matériau biocomposite à formé. Il s'agit de réaliser des tests de manipulation pour s'assurer que le fonctionnement de la machine à vide (déplacement et rotation de la broche) n'entraîne pas de perturbation dans l'obtention des résultats.

### **I.7.1. Fraisage des matériaux composites à fibres végétales**

Le fraisage est l'un des procédés d'enlèvement de matière les plus utilisés dans la préparation pièces composites. Contrairement au fraisage de matériaux métalliques, les composites FRP se caractérisent par des taux d'enlèvement de matière assez faibles. En effet, les pièces sont fabriquées à partir de composites FRP selon des procédés de moulage une fois démonté, le moule produit une forme presque finie et les opérations de finition telles que l'égavurage et le fraisage peuvent prendre un certain temps.

Les opérations de fraisage les plus courantes sont le détourage et le fraisage en bout. L'opération de détourage utilise les arêtes de coupe qui sont à la périphérie de l'outil et la surface usinée est parallèle à l'axe de rotation de la fraise. L'engagement dans la pièce à usiner est quant à lui dans la direction radiale de l'hélice. Ce type de procédé entraîne déchirures inhérentes à la fabrication des matériaux composites. Ce qui se traduit par une qualité moyenne de la surface à usiner.

Le deuxième type de fraisage en bout est le fraisage en avalant, où la pièce est attaquée par une partie plus épaisse du copeau. Les forces d'engagement quant à elles, sont élevées ce qui provoque la poussée de la pièce contre les surfaces de serrage, les forces de coupe varient en fonction de la configuration de fraisage en bout. Dans le cas du fraisage inverse, la force est nulle lorsque l'outil est engagé et est maximale lorsque l'arête de coupe est sur le point de quitter la pièce. L'inverse est vrai pour le fraisage en aval, où la force d'usinage est la plus grande lorsque l'outil est en prise avec la pièce et la plus faible lorsque l'outil est sur le point de quitter la pièce [53]. Comme les autres opérations d'usinage, le fraisage provoque une usure considérable des outils de coupe, principalement en raison de la nature abrasive des outils de coupe et matériaux renforcés de fibres végétales [54]. Par conséquent, les matériaux des outils doivent être soigneusement sélectionnés pour minimiser l'usure. Par ailleurs, la nature des fibres et leur fraction volumique ainsi que la nature de matrice déterminent le choix des outils de coupe et des paramètres d'usinage [54].

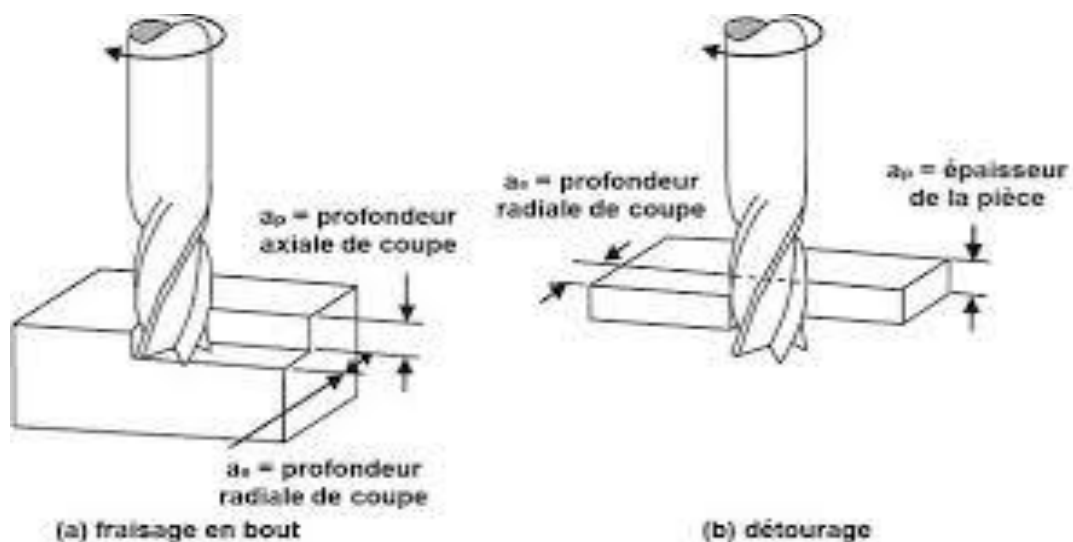
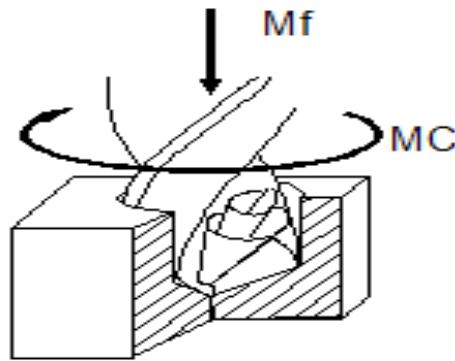


Figure I.10. Les opérations de fraisage [54].

### I.7.2. Perçage des matériaux composites à fibres végétales

Bien que plusieurs procédés d'usinage non conventionnels (usinage laser, usinage jet d'eau et usinage par électroérosion) aient été développés pour traiter les composites stratifiés, les opérations de perçage conventionnelles à l'aide de forets restent le procédé dominant [55]. Le procédé de perçage permet d'obtenir un gain de poids important et est considéré le plus utilisé comme une opération de finition pour les structures en matériaux composites. De plus, entre autre choses, ce procédé permet de réaliser des trous nécessaires à l'assemblage des éléments ou passage des câbles [56].

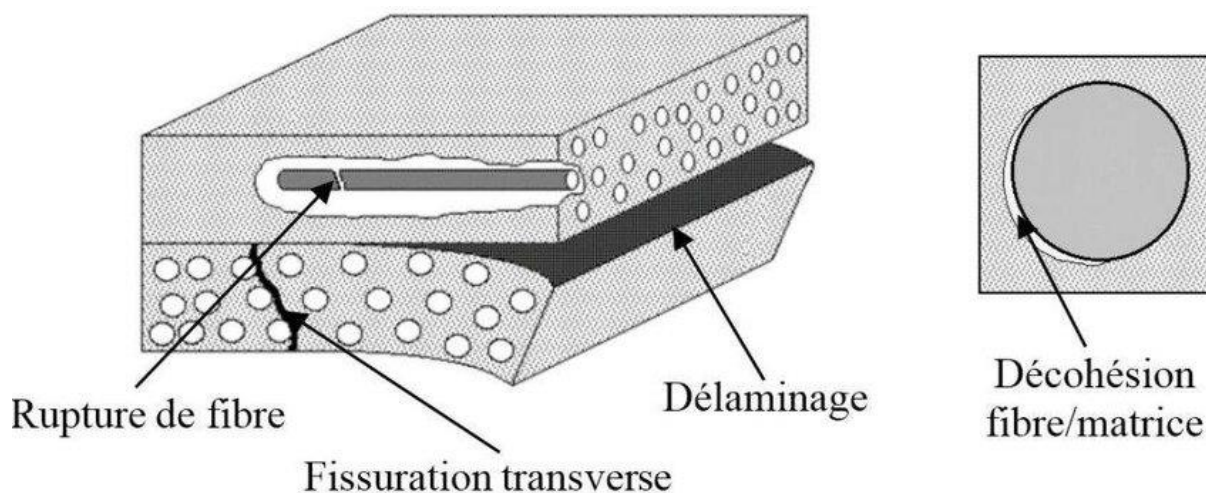


**Figure I.11.** L'opération de perçage [57].

Dans les parois des trous usinés par FRP, on rencontre des défauts similaires à ceux observés lors du perçage de matériaux métalliques (cylindricité, rondeur). Mais, nous avons également constaté des défauts spécifiques provoqués par le mécanisme de découpe (délaminage, retrait des fibres, fissures et dégradation thermique de la matrice), qui rendent le perçage des stratifiés composites extrêmement complexe. Le comportement des composites stratifiés dépend de la disposition des renforts dans la matrice, les dommages induits peuvent donc compromettre leur intégrité structurelle [58]. Par conséquent, les théories de processus de perçage des métaux ne peuvent pas être directement appliqués aux composites en couches. Lors du perçage de composites stratifiés, les défauts dépendent de la nature et des propriétés mécaniques de fibres utilisées, et de propriétés mécaniques de la matrice dans toute l'épaisseur du panneau, et selon la superficie du trou réalisé, nous avons les défauts suivants [59] :

- Défauts à l'entrée du trou (écaillage des premiers plis ou délaminage à l'entrée).
- Défauts de la paroi latérale de l'ouverture (cylindrique, ronde, brute, ect).
- Des défauts en sortie de trou (une cassure dans le dernier pli ou fissure en sortie).

Les dommages causés aux matériaux composites sont également causés par la géométrie de l'outil de coupe, les mouvements de perçage et les caractéristiques des zones riches en résine entre les couches. Le délaminage est le dommage le plus important et est un phénomène de déchirure interfaciale résultant d'une force extérieure conduisant à la séparation des couches de renfort [60].



**Figure I.12.** Certains résultats du processus de perçage [58].

### I.8. Les composites à fibres naturelles dans l'industrie

L'omniprésence des polymères synthétiques, malgré leur coût élevé, pose un défi majeur pour l'environnement. Leur utilisation généralisée dans divers domaines pose des problèmes environnementaux aux majeurs.

Les matériaux à base d'agrocultures tels que les fibres végétales et les polymères naturels deviennent une alternative compétitive, en particulier après l'approbation des lois pour la réduction de l'utilisation de matériaux nocifs pour l'environnement. Ceci a obligé donc de nombreuses grandes entreprises de plastiques des États Unis et d'autres pays européens à être à l'avant-garde dans le développement de matériaux biodégradables à partir de matériaux naturels [61]. Par exemple en Allemagne, l'industrie automobile a connu une augmentation remarquable de l'utilisation des fibres naturelles dans sa production, passant de 9600 tonnes en 1999 à 19000 tonnes en 2005, excluant le bois et le coton. [62].

De nombreux produits composites innovants combinent des fibres naturelles comme le lin, le chanvre, le sisal et le jute avec des polymères synthétiques classiques, trouvant ainsi une application diverse dans l'industrie automobile, notamment pour la fabrication de pièces automobiles. [63].

Les propriétés remarquables des éléments à paroi mince en composites renforcés de fibres naturelle (sisal), telles que leur haute résistance à la traction et à la compression, les rendent parfaitement adaptés à une large gamme d'applications dans le secteur du bâtiment. On les retrouve notamment dans les éléments structurels, les coffrages permanents, les réservoirs, les façades, les éléments de toiture à longue portée et les tuyaux de renforcement des structures existantes [64].

### I.9. Conclusion

Les composites renforcés de fibres naturelles sont des matériaux durables, abordables et respectueux de l'environnement. Ils sont de plus en plus populaires en raison de leurs nombreux avantages, notamment leur faible coût, leur densité peu élevée, leur biodégradabilité, leur disponibilité, leur module spécifique élevé, leur capacité à être recyclés. Ils peuvent être utilisés dans de nombreux domaines, y compris la vie quotidienne et l'industrie automobile.

# **Chapitre II**

## **Etude expérimentale**

**II.1 Introduction**

Ce chapitre décrit les différentes techniques expérimentales utilisées et les conditions d'essais. Il présente les matériaux composites utilisés dans cette étude, notamment les constituants de base, le renfort, la matrice, et leur procédés de fabrication. La préparation des plaques élaborées pour la caractérisation mécanique en perçage par une fraiseuse universelle.

**II.2 Matériaux de l'étude et matériels utilisés****II.2.1 Résine**

Dans cette étude, la résine utilisée est une résine époxy (MEDAPOXY STR), obtenue auprès de la société algérienne GRANITEX, située dans la zone industrielle d'Oued Semmar, Alger.

Cette résine est commercialisée sous forme de kit pré-dosé de deux composants (figure II.1):

MEDAPOXY STR EA : C'est la résine, sa couleur est transparente.

MEDAPOXY STR EB : C'est le durcisseur, sa couleur est brunâtre.

La résine est associée au durcisseur avec des proportions en masse de 60/40, la polymérisation complète de cette résine se fait après 14 jours en température ambiante.

**II.2.2.1 Propriétés de la résine époxy**

- Mass volumétrique : 1500 Kg/m<sup>3</sup>.
- Module d'élasticité : 3 - 5 MPa.
- Effort de flexion maximal : 100 - 150 MPa.
- Allongement maximal : 2 - 5 %.
- Résistance au cisaillement : 30 - 50 MPa.
- Température maximale : résiste à des températures jusqu'à 300 °C.
- Viscosité : 11000 MPa à 25 °C.
- Densité : 1.1
- Couleur après mélange : dominante[65].



**Figure II.1** : Résine utilisée : a) MEDAPOXY STR EA et b) MEDAPOXY STR EB

### II.2.2 Les fibres végétales utilisées

Les fibres utilisées comme renfort dans ce travail sont de deux types, les fibres de lin et les fibres de cactus. Les fibres de lin sont extraites par le processus de macération consistant à tremper les tiges dans l'eau pour les rendre douces et humides, puis elles sont séparées des fibres. Les fibres de cactus sont extraites du tronc de l'arbre de cactus, puis trempées longuement dans l'eau, les faisant fermenter. Après l'extraction les fibres sont lavées et sécher à l'air libre, puis utilisées pour divers usages (figure II.2.).



**Figure II.2** : Fibres de cactus

La fibre de lin utilisée dans ce travail est fournie par l'usine de fabrication des cordes et des câbles en fibres naturelles de BLIDA (figure II.3.).

### II.2.2.1. Propriétés de la fibre de lin

Les **caractéristiques** techniques de la fibre de lin sont présentées dans le tableau **II.2.1** [66].

**Tableau II.2.1** : Propriétés des fibres de lin

Couleur	Température de décomposition	Flexibilité	Humidité	Allongement	Twistabilité	Longueur de la fibre (cm)
Jaune clair	120°C	66	8.7-23%	1.8 - 2.2%	80	15-80



**Figure II.3** : Fibres de lin

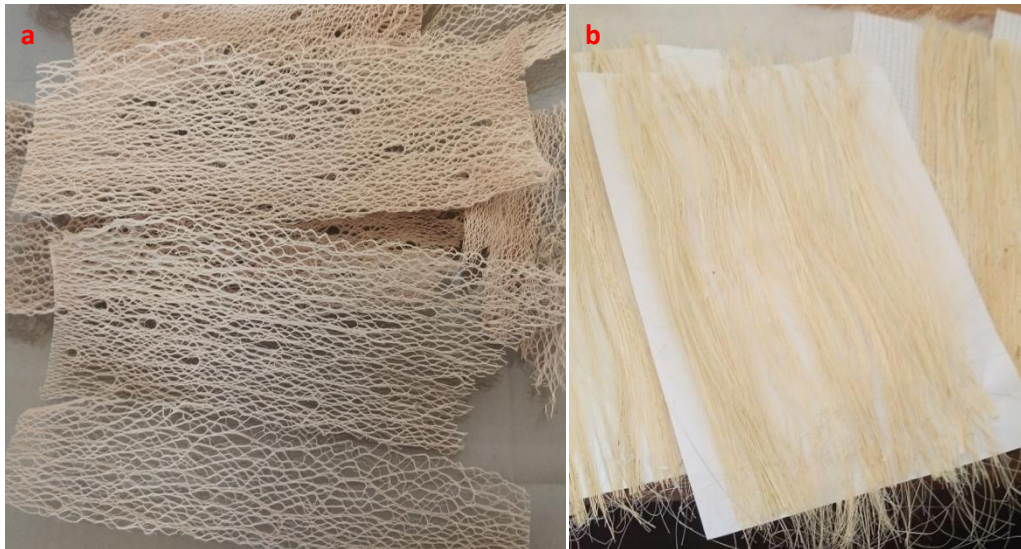
### II.2.3. Préparation du renfort

#### II.2.3.1. Préparation des plis de cactus et du lin

Une fois les fibres sélectionnées pour cette étude sont obtenues, on procède à la préparation du renfort sous forme de plis.

Le renfort de cactus est découpé à partir du tissu cellulaire long (réseau cellulaire ramifié) à partir du tronc de la plante formant ainsi des plis de dimensions 30x15 mm (figure II.4a), tandis que le renfort du lin constitué par des fibres longues, est obtenu à partir des faisceaux de fibres de lin commercialisés.

Les plis de lin, sont formés par des fibres en petits paquets disposés côte à côte et collés sur du papier blanc avec de la colle à papier, le collage est appliqué seulement sur les bouts afin de pouvoir retirer le papier pendant l'élaboration des plaques composites. Le processus de collage se poursuit jusqu'à l'obtention des plis de dimensions de 30 x 15mm (figure II.4b).



**Figure II.4** : Plis en fibres de : a) cactus et b) lin

### II.2.3.2. Pesage des plis

L'opération de pesage des plis est effectuée en utilisant une balance, de type **KERN** d'une précision de 0,01g, du laboratoire de biologie (figure II.5). Cette opération est nécessaire afin de connaître le taux de fibres et prévoir la quantité de résine nécessaire pour la réalisation de la plaque.

- Première plaque :
  - Poids des fibres de cactus : 17 grammes.
  - Poids des fibres de lin : 37.6 grammes.
  - Poids total de tapis : 54.6 grammes.
- Deuxième plaque :
  - Poids des fibres de cactus : 15.8 grammes.
  - Poids des fibres de lin : 34.6 grammes.
  - Poids total de tapis : 49.4 grammes.



**Figure II.5** : Opération de pesage des plis

### II.2.4. Elaboration du matériau composite

Après le découpage des plis on passe à l'élaboration des plaques composite. Ces plaques sont constituées par des fibres de cactus et du lin imprégnés dans une matrice époxyde, formant ainsi des stratifiés de trois plis avec un taux de 30% de fibres.

Les bio composites élaborés sont des stratifiés constitués par 3plis, et ils sont obtenu sous forme de plaques de dimensions 300x150 mm<sup>2</sup>.

L'élaboration des plaques composite s'effectue par une technique de moulage sous vide, dite du « sac ». Cette technique nécessite le suivi de plusieurs étapes qui sont les suivantes :

Préparation de la surface sur laquelle on souhaite travailler, la pose d'une plaque en verre (vitre) recouverte d'un film en plastique, puis la pose d'un morceau de tissu d'arrachage.

En suite la préparation du mélange de résine dans les proportions requises (60/40), suivi du dépôt du premier pli et son étalement par la résine sur toute la surface du pli avec un pinceau, le processus de dépôt de pli et son étalement de résine est répétée pour tous les autres plis constituant la plaque et enfin un tissu d'arrachage est déposé (figure II.6).



**Figure II.6 :** Etapes de préparation des plaques composites stratifiées par la technique du sac.

Le moule est fermé par un film plastique transparent (cellophane) qui est collé sur le pourtour de la plaque en verre par une bande adhésive. Une pompe à vide est utilisée pour dégager les bulles d'airs emprisonner dans le moule et créer une dépression de l'ordre 30 KPa pendant 6 heures (jusqu'à la polymérisation de la plaque). Cette dépression exerce une force de compression et permet de densifier la plaque et dégager les bulles d'airs. La plaque ainsi démoulée après 6 heures est laissée à température ambiante pendant 14 jours afin d'avoir une polymérisation totale. En fin les plaques obtenues seront ajustées afin d'être usinées en perçage.

### II.2.5. Ajustage des plaques obtenues

Les plaques stratifiées obtenues sont ajustées en utilisant une tronçonneuse à disque en diamant de diamètre 200 mm (figure II.7a), et une vitesse de coupe de 2500 tr/min. Les dimensions requises pour ses plaques sont d'une longueur de 90 mm, une largeur de 26 mm avec une épaisseur d'environ 4,56 mm (figure II.7b).



**Figure II.7:** a) Tronçonneuse à disque en diamant et b) Plaques composite obtenues

## II.3. Opération d'usinage en perçage

### II.3.1 Traçage des plaques

Avant l'opération de perçage, les plaques stratifiées sont tracées selon un plan de perçage bien défini. En divisons la plaque en axes longitudinaux et transversaux, l'intersection de chaque deux axes représente le centre d'un trou et chaque plaque contient 27 trous de trois diamètres différents (figure II.8).



**Figure II.8 :** Traçage des plaques pour perçage

### II.3.2 Opération de perçage

Le perçage est une opération d'usinage qui consiste à percer des trous dans une pièce. Ce trou peut passer d'un côté à l'autre de la pièce appelé trou traversant ou débouchant, un trou borgne est un trou qui ne traverse pas. Plusieurs procédés d'usinage sont utilisés pour l'obtention d'un trou, le perçage, la découpe au poinçon (trou traversant), par électroérosion, par laser, par brochage, etc. Les trous sont généralement utilisés pour le passage des pièces ou du fluide, l'assemblage des pièces pour accueillir des rivets (trou lisse) ou des vis d'assemblage (trou taraudé).

La recherche s'est limitée au forage de trous cylindriques lisses à l'aide d'un outil rotatif coupant appelé foret (RYAD, 2018).

#### II.3.2.1 Machine utilisée

Les opérations d'usinage en perçage des plaques stratifiées sont réalisées en utilisant une fraiseuse universelle de la cimenterie de Hjar Essoud (figure II.9). Cette machine est équipée d'une vitesse de rotation et une vitesse d'avance maximales de 1600 tr/min et 500 mm/min respectivement. Dans cette machine, le mouvement de coupe et le mouvement de rotation sont donnés à l'outil, tandis que le mouvement d'avance, c'est un mouvement de translation, est donné à la pièce.



**Figure II.9 :** Fraiseuse universelle

### II.3.2.2 Outils de perçage utilisés

Le choix de l'outil de perçage est crucial pour garantir un perçage réussi des plaques étudiées. Il est essentiel d'opter pour un outil de haute dureté capable de pénétrer le matériau sans se casser ni se déformer.

Les outils de perçage utilisés dans cette étude sont des forets HSS, également connus sous le nom de forets en acier rapide. Le terme "HSS" fait référence à "High-Speed Steel", qui se traduit en français par « acier rapide ». L'acier rapide est un matériau réputé pour sa durabilité, sa résistance à l'usure et sa dureté élevée face à de fortes contraintes.

Trois forets de différents diamètres sont utilisés, 5mm, 7mm et 10mm (figure II.9).



**Figure II.9:** Forets de perçage utilisés

### II.3.2.3.Processus de perçage

Les opérations de perçage sont effectuées sur des plaques stratifiées selon un plan de perçage prédéfini (tableau2). Deux types de stratifiés ont été utilisés, le stratifié lin/cactus/lin, est désigné comme *matériau1* et le stratifié lin/2sisal/lin, est désigné comme *matériau2*.

D'après la littérature, le processus de perçage comporte un grand nombre de paramètres, trois paramètres d'usinage ont été pris en compte, à savoir : l'avance ( $f$ ), la vitesse de rotation ( $N$ ) et le diamètre du foret ( $d$ ).

**Tableau 2** : Plan de perçage

N°	$d$ (mm)	$f$ (mm/min)	$N$ (tr/min)
1	5	12.5	315
2	5	12.5	1000
3	5	12.5	1600
4	5	80	315
5	5	80	1000
6	5	80	1600
7	5	500	315
8	5	500	1000
9	5	500	1600
10	7	12.5	315
11	7	12.5	1000
12	7	12.5	1600
13	7	80	315
14	7	80	1000
15	7	80	1600
16	7	500	315
17	7	500	1000
18	7	500	1600
19	10	12.5	315
20	10	12.5	1000
21	10	12.5	1600
22	10	80	315
23	10	80	1000
24	10	80	1600
25	10	500	315
26	10	500	1000
27	10	500	1600

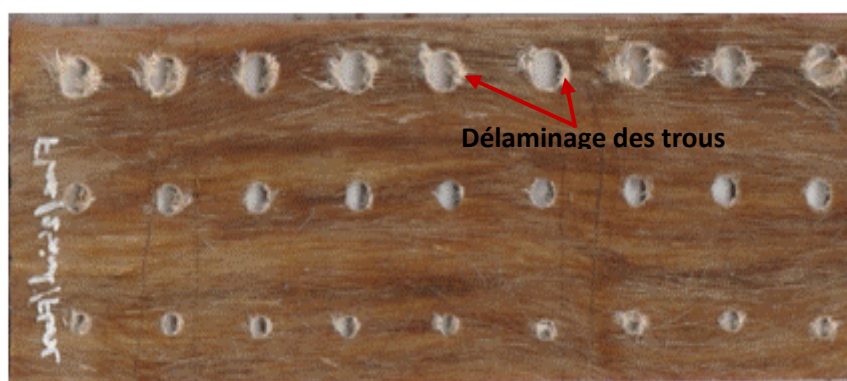
Lors du perçage, les plaques sont fixées sur la table de la machine pour garantir leur stabilité pendant l'usinage (figure II.10). Les trous sont ensuite percés selon les spécifications du plan de perçage.



**Figure II.10:** Processus de perçage des plaques stratifiées

### II.5.2.Observation des défauts d'usinage

L'observation des plaques usinées montre que pendant l'opération de perçage, le foret provoque un délaminage lors de son passage dans le matériau, par un arrachement des fibres vers le haut à du foret et une poussée des fibres vers le bas à la sortie du foret (figure II.11).



**Figure II.11 :** Plaque après perçage

Le facteur de délaminage est mesuré à la sortie du foret par un logiciel de traitement d'image appelé « image J ». Ce logiciel permis de mesurer le diamètre de délaminage autour d'un trou comme suit (figure II.12):

- Etalonnage de l'échelle de mesure.

- Sélection de la zone délaminée par traçage des cercles.
- Mesure du diamètre de la zone délaminée.

Cette opération est répétée pour l'ensemble des trous percés.



**Figure II.12 :** Zone de délaminage entre le diamètre nominal et le diamètre maximal

Le calcul du facteur de délaminage  $F_d$  est donné par l'équation suivante :

$$F_d = D_{\max} / D$$

II.1

# **Chapitre III**

## **Résultat et discussion**

### III.1. Introduction

Cette section s'intéresse à l'influence de divers paramètres de coupe sur deux matériaux composites étudiés précédemment. Les analyses sont basées sur des courbes graphiques montrant l'influence de la vitesse d'avance sur le facteur de délaminage lorsque la vitesse de rotation est constante pendant chaque cas.

### III.2. Analyse et discussion

Les résultats du facteur de délaminage obtenus lors de l'opération de perçage sont calculés par l'équation (Eq II.1) selon le tableau III.1.

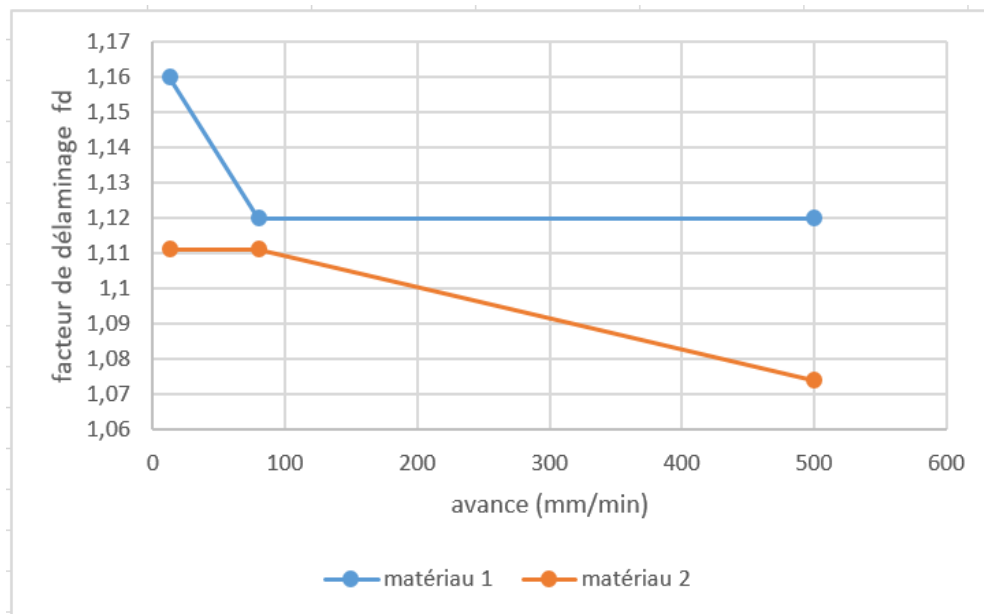
**Tableau III.1** : Plan de perçage et facteur de délaminage associé.

N°	$d$ (mm)	$f$ (mm/min)	$N$ (tr/min)	$F_d$ Matériau1	$F_d$ Matériau2
1	5	12.5	315	1.0382	1.1112
2	5	12.5	1000	1.0382	1.1112
3	5	12.5	1600	1.4998	1.037
4	5	80	315	1.0382	1.1112
5	5	80	1000	1.1536	1.1482
6	5	80	1600	1.1536	1.1482
7	5	500	315	1.0382	1.074
8	5	500	1000	1.0382	1.074
9	5	500	1600	1.0382	1.1112
10	7	12.5	315	1.0987	1.0581
11	7	12.5	1000	1.0987	1.0317
12	7	12.5	1600	1.1261	1.0317
13	7	80	315	1.0437	1.0581
14	7	80	1000	1.0437	1.1124
15	7	80	1600	1.0437	1.0847
16	7	500	315	1.0712	1.1418
17	7	500	1000	1.1261	1.1111
18	7	500	1600	1.0437	1.0317
19	10	12.5	315	1.019	1.0741
20	10	12.5	1000	1.0575	1.370
21	10	12.5	1600	1.0575	1.0741
22	10	80	315	1.019	1.0370
23	10	80	1000	1.019	1.0370
24	10	80	1600	1.0383	1.0556
25	10	500	315	1.0383	1.0115
26	10	500	1000	1.096	1.0370
27	10	500	1600	1.019	1.0370

Les figures ci-dessous présentent la variation du facteur de délaminage calculé à la sortie du foret après l'opération de perçage en fonction de l'avance  $f$  (12,5, 80 et 500 mm/mn), pour différentes vitesses de rotation (315, 1000 et 1600 tr/mn) et différents diamètres de forêts (5, 7 et 10 mm).

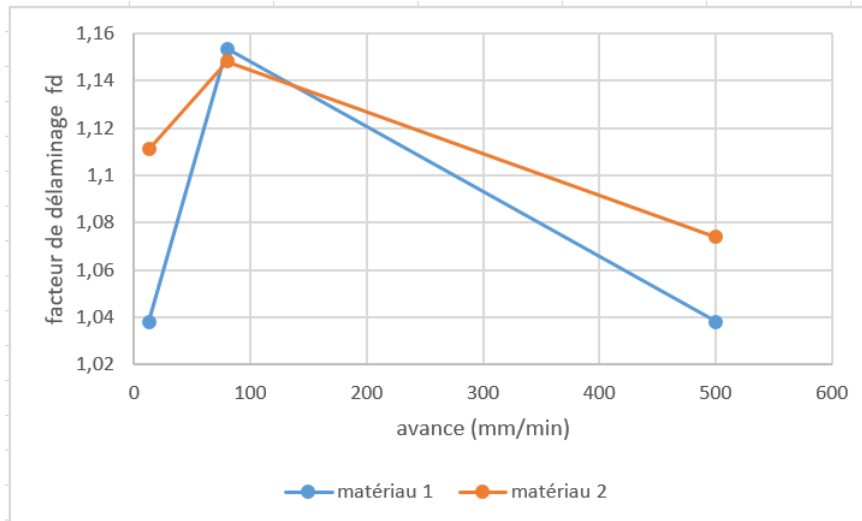
L'objectif est d'analyser l'effet de l'augmentation de l'avance sur le facteur de délaminage.

La variation du facteur de délaminage en fonction de l'avance  $f$  pour un diamètre  $D= 5\text{mm}$  et une vitesse de rotation  $N= 180\text{ tr/mn}$  est présenté sur la figure III.1. On remarque que lorsque la valeur d'avance est minimale 12,5 mm/min, le matériau1 (lin/cactus/lin) présente un délaminage plus important que le matériau2 (lin/2sisal/lin). Pour une valeur d'avance moyenne 80 mm/min, les deux matériaux affichent des valeurs approximativement similaires du facteur de délaminage, Pour la valeur d'avance maximale 500 mm/min, le facteur de délaminage du matériau2 demeure nettement inférieur à celui du matériau composite 1.



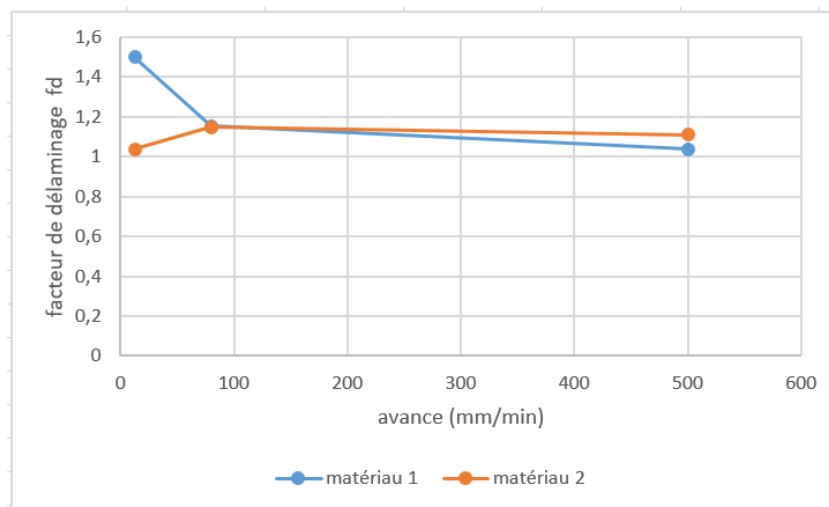
**Figure III.1.** Influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas de  $D=5\text{mm}$  et  $N=315\text{tr/min}$ .

La figure III.2 présente la variation du facteur de délaminage en fonction de l'avance  $f$  pour un diamètre  $D= 5\text{mm}$  et  $N= 1000\text{ tr/mn}$ . Sur cette figure le matériau2 présente un délaminage plus important que le matériau1 pour la petite avance (12,5 mm/min) et un rapprochement considérable du facteur de délaminage des deux matériaux, avec une légère supériorité pour le matériau 1 et sa valeur dépasse légèrement celui su matériau2. Lorsque la valeur d'avance est maximale (500mm/min), le matériau2 affiche un délaminage nettement supérieur à celui du matériau 1.



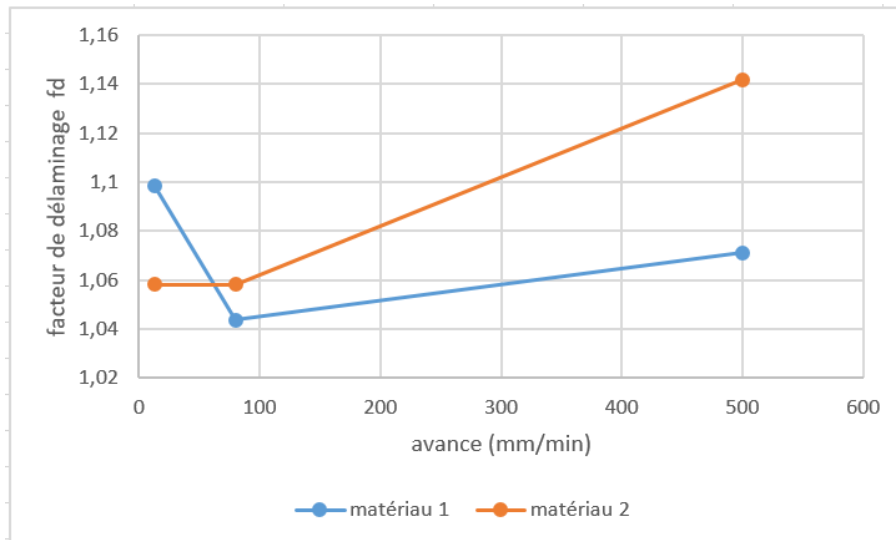
**Figure III.2.** Influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas de  $D=5\text{mm}$  et  $N=1000\text{tr/min}$ .

Dans la figure III.3, la valeur du facteur de délaminage est supérieure pour le matériau1 à celle du matériau2 pour l'avance  $f$  de  $12,5\text{ mm/min}$ . Et elle est pratiquement la même quand la vitesse de rotation augmente, avec une légère supériorité pour le matériau2 dont la valeur dépasse légèrement la valeur du matériau.



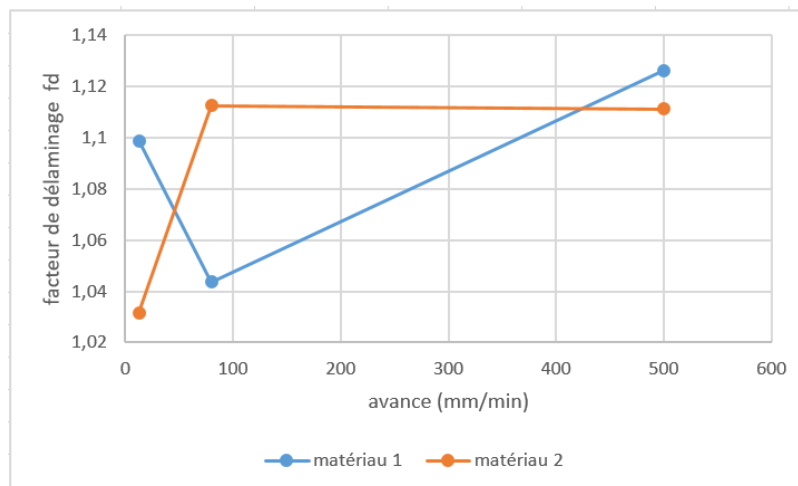
**Figure III.3.** Influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas de  $D=5\text{mm}$  et  $N=1600\text{tr/min}$ .

Les graphiques de la figure III. 4 représentent les variations du facteur de délaminage en fonction de l'avance  $f$ , pour un  $D= 7\text{mm}$  et  $N= 315\text{ tr/min}$  pour le matériau1 et le matériau2. On constate que le matériau1 présente un délaminage élevé que celui du matériau 2 quand l'avance est minimale ( $12,5\text{ mm/min}$ ). Contrairement, pour la vitesse d'avance élevée, le délaminage est élevé pour le matériau2. Le facteur de délaminage est faible pour l'avance moyenne ( $80\text{mm/min}$ ).



**Figure III.4.** Influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas  $D=7\text{mm}$  et  $N=315\text{ tr/min}$ .

La variation du facteur de délaminage en fonction de l'avance  $f$ , pour un  $D=7\text{mm}$  et  $N=1000\text{ tr/min}$  représenté sur la figure III.5. On constate un délaminage faible des deux matériaux pour l'avance  $12,5\text{mm/min}$ , contrairement à celui de l'avance maximale ( $500\text{mm/min}$ ) qui est plus important. Le matériau1 affiche un délaminage faible par rapport à celui du matériau2 pour la cas de l'avance moyenne ( $80\text{ mm/min}$ ).

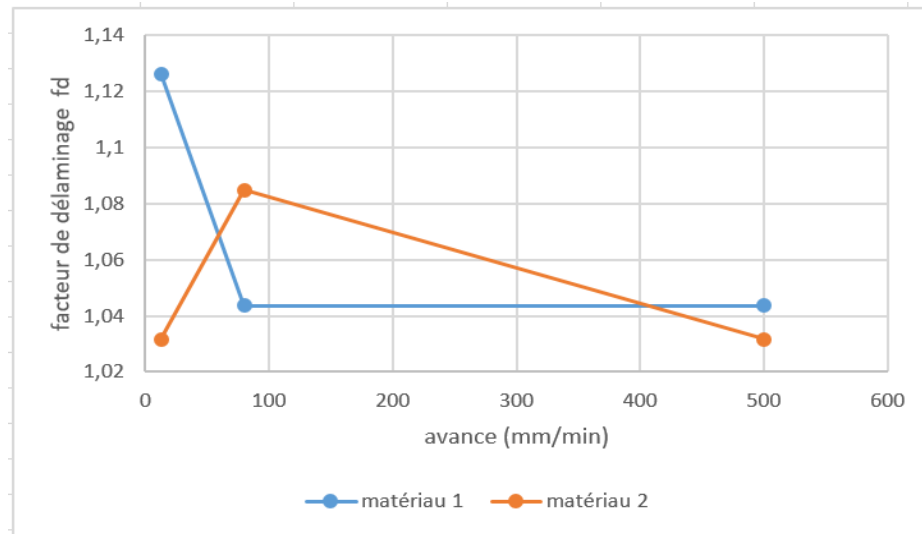


**Figure III.5.** Influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas  $D=7\text{mm}$  et  $N=1000\text{ tr/min}$ .

La figure ci-dessous (figure III.6) présente le délaminage des deux matériaux en fonction de l'avance  $f$ , pour un diamètre de foret  $D=7\text{mm}$  et une vitesse de rotation  $N=1600\text{ tr/min}$ . On constate que le délaminage diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation.

Lorsque l'avance est minimale ( $12,5\text{ mm/min}$ ), le matériau1 présente un délaminage plus important que le matériau2 et contrairement pour l'avance moyenne de  $80\text{ mm/min}$ , le matériau2 affiche un

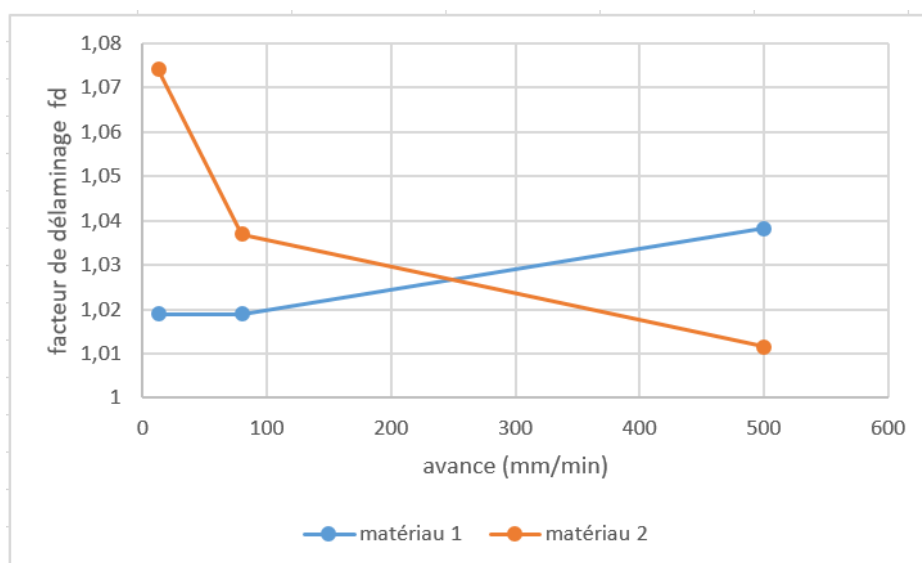
délaminage plus important. Le facteur de délaminage des deux matériaux est approximativement similaire, avec une légère supériorité pour le matériau 1 pour l'avance maximale  $f=500$  mm/min.



**Figure III.6.** Influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas de  $D=7$  mm et  $N=1600$  tr/min

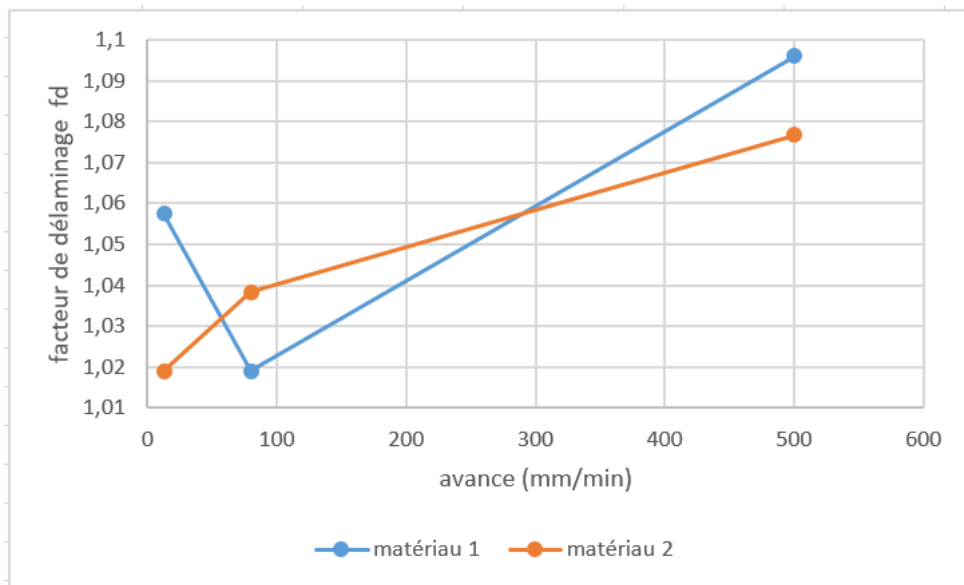
La figure III.7 présente la variation du facteur de délaminage en fonction de l'avance, pour un diamètre de foret  $D=10$  mm et une vitesse de rotation  $N=180$  tr/mn. On remarque que du matériau 1 diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation contrairement à celui du matériau 1 qui augmente. Pour l'avance minimale et moyenne (12,5 mm/min et 80 mm/min respectivement), le matériau 2 donne un délaminage plus important que celui du matériau 1.

Contrairement le matériau 1 présente un délaminage plus important que le matériau 2 pour l'avance maximale (500 mm/min).



**Figure III.7.** Influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas de  $D=10$  mm et  $N=315$  tr/min.

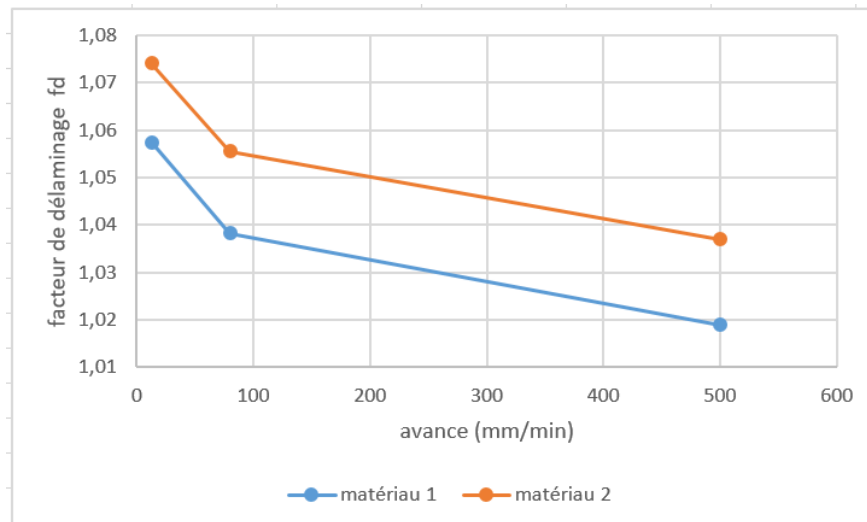
Les courbes graphiques présentées sur la figure III.7 illustre le facteur de délaminage pour le cas du diamètre de foret  $D=10\text{mm}$  et une vitesse de rotation  $N=1000\text{ tr/min}$ . On remarque que le délaminage est proportionnel avec l'augmentation de la vitesse de rotation. Pour les avances minimale et maximale, le matériau1 présente un délaminage plus important que celui du matériau2. Et contrairement, pour l'avance moyenne (80mm/min), le matériau2 présente un délaminage plus important que celui du matériau1.



**Figure III.8.** Influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas de  $D=10\text{mm}$  et  $N=1000\text{ tr/min}$ .

Les graphiques de la figure III.9 présente la variation du facteur de délaminage en fonction de l'avance  $f$  (mm/min pour un diamètre  $D=4\text{mm}$  et  $N=180\text{ tr/min}$ ). On constate une baisse significative des valeurs du facteur de délaminage avec l'élévation de l'avance  $f$  pour les deux cas de matériaux étudiés.

La courbe du matériau 2 se situe à dessus de la courbe du matériau 1 de manière parallèle, et cela signifie que les valeurs du facteur de délaminage du matériau 2 sont supérieures aux valeurs du facteur de délaminage du matériau1 pour les diverses vitesses d'avance.



**Figure III.9.** Influence de l'avance sur le facteur de délaminage pour le cas de  $D=10\text{mm}$  et  $N=1600\text{ tr/min}$ .

### III.3 Observation du délaminage

Lors du perçage le foret engendre à l'entrée et à la sortie de la plaque un délaminage. L'observation montre un arrachement de fibres qui varie selon les conditions de coupe utilisé et la nature du matériau utilisé. On constate que le matériau 2 (lin/2sisal/lin) est affecté par le délaminage en comparaison à celui du matériau 1 (lin/cactus/lin).



**Figure III.10 :** Observation du délaminage : a) matériau 1 et b) matériau 2

**III.4. Conclusion**

D'après l'étude expérimentale, on peut remarquer que le facteur de délaminage peut être influencé par plusieurs facteurs spécifiques, tels que le diamètre du foret, la vitesse d'avance et la vitesse de rotation, ainsi que la nature du matériau. La variation notée dans les résultats est liée aux paramètres de coupe, l'augmentation de la température de coupe et le mauvais état de surface du trou percé. Donc, il est recommandé de surveiller le facteur de délaminage lors de la fabrication des pièces en matériaux composites pour garantir leur qualité et leur durabilité.

## Conclusion général

Cette étude s'est concentrée sur la compréhension, l'exploration et l'utilisation des bio composites dans différents domaines. Un aperçu des bio composites, des techniques d'extraction des fibres naturelles, des différents procédés de fabrication, et du comportement thermique et mécanique des matériaux bio composites, ainsi que leurs application dans l'industrie ont été présentés.

La fabrication du matériau composite par la technique de contact à permis de comprendre le processus de réalisation en superposant les fibres de lin et de cactus imprégnées dans une résine époxyde.

Le processus d'usinage des composites, en particulier le perçage, nécessite une attention particulière en raison de la nature hétérogène du matériau. Des paramètres de coupe appropriés doivent être utilisés pour éviter les dégradations et les défauts d'usinage.

La qualité du perçage a été distinguée par la mesure des défauts dimensionnels et de la géométrie du trou, et les résultats de l'analyse ont montré une fois de plus l'influence de la géométrie de l'outil sur la valeur de ces paramètres.

L'augmentation de l'avance et du diamètre du foret entraîne une augmentation des défauts de perçage (défaut en sortie et sur la paroi du trou) pour toutes les conditions de perçage testées.

## Références:

- [1] A. Y. Nenonene, "Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage", thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009.
- [2] F. Laurans, A. Déjardin, J. Pilate, "Physiologie de la formation des parois de fibres de bois", composites et matériaux avancés, Vol.16, pp.27-39, 2006.
- [3] N. Anil "composite get greener", Material today, Vol 45, pp12, 2001.
- [4] E. BODROS, C. BALEY, "Etude des propriétés de biopolymère renforcés par des fibres de lin aléatoirement dispersées dans le plan de stratification", propriété aux interfaces et composites, Université de Bretagne-Sud, 2006.
- [5] F. Gouanvé, S. Marais, M. Métayer, "composites polyester insaturé renforcés par des fibres de lin", composites et matériaux avancés, Vol.16, pp.117-128, 2006.
- [6] M. Nardin, "interface fibre-matrice dans les matériaux composites application aux fibres végétales", revue des composites et des matériaux avancés, Vol 16, pp 49-61, 2006.
- [7] Prof-Rafic Younes « Matériaux composites ».
- [8] S.V. Joshua, L. Arora, 2004; Areuatal fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced.
- [9] Céline et al., 2014, Müssing et al., 2005, Zimniewska et al., 2011
- [10] Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H.P., et al. (2012) Biocomposites Reinforced with Natural Fibers: 2000-2010. Progress in Polymer Science, 37, 1552-1596.
- [11] Zhu, J., Zhu, H., Njuguna, J., & Abhyankar, H. (2013). Recent Development of Flax Fibres and Their Reinforced Composites Based on Different Polymeric Matrices. Materials, 6(11), 5171.
- [12] <https://www.polyvia-formation.fr/actualites/la-plasturgie-cest-quoi/les-composites-cest-quoi/>
- [13] Djebbloun Youcef, Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des matériaux composites, Université de Biskra (2004).
- [14] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/plastiques-et-environnement-42657210/fibres-naturelles-de-renfort-pour-materiaux-composites-am5130/>.
- [15] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/plastiques-et-environnement-42657210/fibres-naturelles-de-renfort-pour-materiaux-composites-am5130/>.
- [16] <http://www.bloomoon.eu/fr/actualites/lettres-de-veille-et-white-papers/materiaux-composites-tendances>.
- [17] <https://www.mattechjournal.org/articles/mattech/abs/1993/09/mattech19938110sp67/matt ech19938110sp67.htm>.
- [18] Kalia S. Lignocellulosic Composite Materials: Springer; 2017.
- [19] Bouzouita S. Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel: Ecole Centrale de Lyon; Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir; 2011.
- [20] Zakikhani P, Zahari R, Sultan M, Majid D. Bamboo fibre extraction and its reinforced polymer composite material. Int J Chem, Mater Sci Eng 2014;8:54-7.
- [21] Das P, Nag D, Debnath S, Nayak L. Machinery for extraction and traditional spinning of plant fibres. 2010.

- [22] Do Thi VV. Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non: Université de Grenoble; 2011.
- [23] Labidi K, Cao Z, Zrida M, Murphy A, Hamzaoui AH, Devine DM. Alfa fiber/polypropylene composites: Influence of fiber extraction method and chemical treatments. *Journal of Applied Polymer Science* 2019; 136:47392.
- [24] Dallel M. Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima L.*): Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil: Université de Haute Alsace-Mulhouse; 2012.
- [25] Kessler R, Becker U, Kohler R, Goth B. Steam explosion of flax4a superior technique for upgrading fibre value. *Biomass and Bioenergy* 1998; 14:237-49.
- [26] Sayeb S, Marzoug I, Hassen MB, Sakli F, Rodesli S. Study of water sorption properties for esparto grass ultimate fibre (ALFA fibre). *Journal of the Textile Institute* 2010; 101:19-27.
- [27] Msahli S, Sakli F, Drean J-Y. Study of textile potential of fibres extracted from Tunisian *Agave Americana L.* *AUTEX Research Journal* 2006 ;6 :9-13.
- [28] Maafi EM, Tighzert L, Malek F. Elaboration and characterization of composites of castor oil based polyurethane and fibers from alfa stems. *Journal of Applied Polymer Science* 2010; 118:902-9.
- [29] Marzoug IBA, Sayeb S, Hassen MB, Sakli F, Rodesli S. Study of Some Properties of the Esparto Grass Fiber Waste (ALFA Fiber). *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management* 2011;7.
- [30] Hakeem KR, Jawaid M, Rashid U. *Biomass and bioenergy*: Springer; 2016.
- [31] Fila G, Manici L, Caputo F. In vitro evaluation of dew-retting of flax by fungi from southern Europe. *Annals of applied biology* 2001; 138:343-51.
- [32] Henriksson G, Akin DE, Hanlin RT, Rodriguez C, Archibald DD, Rigsby LL, et al. Identification and retting efficiencies of fungi isolated from dew-retted flax in the United States and Europe. *Appl Environ Microbiol* 1997; 63:3950-6.
- [33] Sisti L, Totaro G, Vannini M, Celli A. Retting process as a pretreatment of natural fibers for the development of polymer composites. *Lignocellulosic composite materials*: Springer; 2018. p. 97-135.
- [34] [https://www.techniques-ingenieur.fr/Techniques de mise en œuvre des matériaux composites à fibres végétales, 2003](https://www.techniques-ingenieur.fr/Techniques_de_mise_en_oeuvre_des_matériaux_composites_à_fibres_végétales,2003).fr(Décembre 2023).
- [35] A.V.NGUYEN ,Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances des systèmes robotique », thèse de doctorat, université Blaise Pascal Clermont II, 2015
- [36] CHRETIEN G., « Matériaux composites à matrice organique polymère et renfort type, Caractéristique Technique de mise en œuvre application », LAVOISIER, PARIS 1986.
- [37] fiéi. rts ng d elaborationg caractérisation mécanique et h grothermique d'un strati renforcé par des fibres naturelles », Mémoire de Magister, université de M'Hamed ,Aoumerdes ,AtsG r 2014.
- [38] A.V.NGUYEN ,Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances des systèmes robotique », thèse de doctorat, université Blaise Pascal Clermont II, 2015
- [39] Maurice Reyne *Technologie des composites* Edition, Hermès 2009.

- [40] Harrache, R. « Elaboration et caractérisation des composites à matrice polymère et renforts végétal et nanométrique lammellaire », Thèse de magister, Université Ferhat Abbas Sétif-1-, 2015, pp 132.
- [41] A.Moktari, « influence des ajoutd de fins minérales sur les performances mécanique des bétons renforcé de fibre végétales de palmier dattier », université de Kasdi Merbah Ouargla option génie civil, novembre 2006.
- [42] Kalia, S., Kaith, B.S., Kaur, I. (2011). Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites: Green Chemistry and Technology. (p. 8-87). Springer Heidelberg. London
- [43] Monteiro, S.N, Calado, V, Rodriguez, R.J.S, Mara
- [44] Nwabunma, D., Kyu, T. (2008). Polyolefin Composites, (p. 238). Wiley Edition. Canada
- [45] Manikandan Nair, K.C., Thomas, S., Groeninckx, G. (2001). Thermal and dynamic mechanical analysis of short sisal fibre reinforced polystyrene composites. Composite Science and Technology, 61(16), 2519- 2529.
- [46] D.B. Dittenber, H.V. GangaRao, Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure, Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 43 (2012) 1419–1429.
- [47] A. Shalwan, B.F. Yousif, In state of art: mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres, Mater. Des. 48 (2013) 14–24
- [48] D. Ray, B.K. Sarkar, A.K. Rana, N.R. Bose, The mechanical properties of vinyl ester resin matrix composites reinforced with alkali-treated jute fibres, Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 32 (2001) 119–127
- [49] D. Plackett, T.L. Andersen, W.B. Pedersen, L. Nielsen, Biodegradable composites based on L-poly lactid
- [50] C.-S. Wu, Renewable resource-based composites of recycled natural fibers and maleated polylactide bioplastic: Characterization and biodegradability, Polym. Degrad. Stab. 94 (2009) 1076–1084.
- [51] D.B. Dittenber, H.V. GangaRao, Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure, Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 43 (2012) 1419–1429.
- [52] C. Morvan, C. Andème-Onzighi, R. Girault, D.S. Himmelsbach, A. Driouich, D.E. Akin, Building flax fibres: more than one brick in the walls, Plant Physiol. Biochem. 41 (2003) 935–944.
- [53] **Y.C.A. Jamal**, Machining of Polymer Composites. Springer 2009
- [54] **R. Teti**, Machining of Composite Materials, CIRP Annals-Manuf Techno 2002, 51 (2) : 611-34.

- [55] Liu, D., Tang, Y., & Cong, W. L. (2012). A review of mechanical drilling for composite laminates. *Composite Structures*, 94(4), 1265-1279. doi: 10.1016/j.compstruct.2011.11.024.
- [56] S. Abrate, Article January 1997, Southern Illinois University Carbondale.
- [57] <http://metaluver.wifea.com>
- [58] Miller, J., Eneyew, E. D., & Ramulu, M. (2013). Machining and drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites. *SAMPE Journal*, 49(2), 36-46.
- [59] Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F., & Surcin, L. (2001). Drilling of composite structures. *Composite Structures*, 52, 511-516.
- [60] Lotfi, A., Li, H., & Dao, D. V. (2019). Effect of Drilling Parameters on Delamination and Hole Quality in Drilling Flax Fiber Reinforced Bio-Composites. Dans D. Dao, R. J. Howlett, R. Setchi & L. Vlacic (Éds.), *Sustainable Design and Manufacturing 2018* (pp. 71-81). Springer International Publishing.
- [61] K. G. Satyanarayana, G. G. Arizaga, and F. Wypych, "Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—An overview," *Progress in polymer science*, vol. 34, pp. 982-1021, 2009.
- [62] M. Carus, S. Ortmann, C. Gahle, and C. Pendarovski, "Use of natural fibres in composites for the German automotive production from 1999 till 2005," Nova-Institut, Hurth, 2006.
- [63] L. Mohammed, M. N. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, and M. S. Islam, "A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015, 2015.
- [64] K. Joseph, R. D. Tolêdo Filho, B. James, S. Thomas, and L. H. d. Carvalho, "A review on sisal fiber reinforced polymer composites," *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 3, pp. 367-379, 1999
- [65] (<http://www.azafir.com>, s.d.)(propriétés (propriétés de la résine époxy, 2012)
- [66] <https://almerja.net> (الانصاري, 2023)
- [67] [http://voilesalternatives.com/documents/divers/bambou/bambou\\_suite/materiaux\\_composites\\_fibres\\_naturelles.pdf](http://voilesalternatives.com/documents/divers/bambou/bambou_suite/materiaux_composites_fibres_naturelles.pdf)