

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université du 20 Août 1955 Skikda**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Mécanique**



N° d'ordre : D012123026D

**THESE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

**Doctorat LMD**

Spécialité : Génie Mécanique

Par :

Mr. ADDA Bachir

**Optimisation des performances mécaniques des biocomposites à  
matrice époxyde renforcée par des fibres naturelles : Modélisation  
par RSM et ANN**

Soutenue le :

Devant le Jury composé par :

Président	BOUSSAHA El hadi	MCA	Université de Skikda
Encadreur	BELAADI Ahmad	Professeur	Université de Skikda
Examineur	KHERAYEF N. Mohamed	MCA	ENSET Skikda
Examinatrice	BAHLOUL Abida	MCA	Université de Guelma
Examineur	INEL Fouad	Professeur	Université de Skikda
Co-Encadreur	MAKHLOUF Azzedine	MCA	Université de Khenchela

Année universitaire

2023/2024

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes parents*

*Ma femme et Ma fille*

*A mon frère et mes sœurs*

*A tout ceux que j'aime et m'aiment*

# Remerciements

Tous d'abord, nous tiens à remercier Dieu clément et miséricordieux de notre avoir donné la force et le courage de mener à terme ce modeste travail. Comme, c'est un plaisir de remercier tous ce qui ont contribué à la Réalisation de ce mémoire :

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire **Dr. AHMAD BELAADI**, Département Génie mécanique, Université Du 20 Aout 1955 Skikda, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'Université de 20 AOÛT 1955 SKIKDA et les intervenants professionnels responsables de ma formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

**Dr. MESSAOUDA BOUMAAZA**, Laboratoire de Génie Civil & Hydraulique (LGCH), Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie, pour m'aider.

**Prof. MOSTEFA BOURCHAK**, Département d'ingénierie aérospatiale, Université King Abdulaziz, Jeddah, Arabie saoudite, pour sa contribution à la rédaction de la publication.

Nous voudrions aussi remercier **Mr MADI BELKACEM**, Département Génie mécanique, Université Du 20 Aout 1955 Skikda, pour leurs encouragements.

# Table des matières

---

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

---

## CHAPITRE I

---

I.1 Introduction .....	3
I.2 Fibres naturelles et leur rôle en tant que renfort .....	4
I.3 Méthodes de traitement des fibres naturelles .....	12
I.3.1 Traitement alcalin .....	12
I.3.2 Traitement par l'acétone .....	13
I.3.3 Traitement par benzoyle .....	13
I.4 Traitement d'estérification .....	14
I.4.1 Réaction d'acétylation.....	14
I.5 Traitement au permanganate .....	14
I.6 Autres traitements chimiques.....	14
I.7 Compositions chimiques et propriétés physiques des fibres naturelles .....	15
I.7.1 Cellulose.....	15
I.7.2 Hémicellulose.....	16
I.7.3 Lignine.....	17
I.7.4 pectine .....	17
I.8 Modifications de la surface des fibres naturelles.....	18
I.9 Composites / Biocomposites.....	18
I.9.1 Composites à matrice polymère (CMP) .....	19
I.9.2 Avantages de l'utilisation de composites à base de fibres naturelles .....	20
I.10 Techniques de fabrication de biocomposites .....	21
I.10.1 Technique de moulage ouvert .....	23
I.10.1.1 Pose à la main .....	23
I.10.1.2 Pose au pistolet.....	24
I.10.1.3 Enroulement de filament .....	24
I.10.2 Technique de moulage fermé .....	25
I.10.2.1 Moulage par compression.....	26
I.10.2.2 Pultrusion.....	27
I.10.2.3 Moulage du sac sous vide .....	28
I.10.2.4 Moulage par transfert de résine (MTR) .....	29
I.10.2.5 Traitement de perfusion sous vide .....	30
I.10.2.6 Le moulage par injection.....	31
I.10.2.7 Extrusion .....	33
I.11 Usinage des biocomposites.....	33
I.11.1 Techniques de perçage .....	34
I.11.1.1 Perçage mécanique conventionnel .....	35
I.11.1.2 Méthodes de perçage non conventionnelles.....	36
I.11.2 Paramètres du perçage.....	37

I.11.3 Mesures des paramètres de performance du perçage .....	39
I.11.3.1 Délaminage .....	39
I.12 Désossage et retrait des fibres.....	42
I.12.1 Microchargement matriciel .....	43
I.12.2 Fracture de la fibre.....	43
I.13 Conclusion.....	43

---

## CHAPITRE II

---

Résumé .....	45
II.1 Introduction .....	46
II.2 Matériaux et méthodes .....	48
II.2.1 Fabrication de biocomposites .....	48
II.2.1.1 Matières premières utilisées.....	48
II.2.1.2 Fibres de jute .....	49
II.2.1.3 Résine époxy et durcisseur .....	49
II.2.2 Préparation des composites hybrides .....	50
II.3.1 Procédure expérimentale de perçage .....	52
II.3.2 Expérimental de design.....	54
II.4 Caractérisation des composites jute/résine.....	59
II.4.1 Essai de traction des stratifiés.....	60
II.4.2 Essai de flexion.....	61
II.4.2.1 Principe de l'essai .....	61
II.5 Caractérisation physique de la fibre de jute .....	62
II.5.1 Analyse par MEB des fibres de jute.....	62
II.5.2 Analyse de spectroscopie FTIR.....	62
II.5.3 Analyse DRX .....	63
II.6 Caractérisation thermique la fibre de jute .....	64
II.6.1 Analyse thermogravimétrique (TG-DSC) .....	64
II.7 Conclusion.....	65

---

## CHAPITRE III

---

Résumé.....	66
III.I Introduction.....	67
III.2 Résultats et discussions .....	68
III.2.1 Propriétés mécaniques des fils de jute.....	68

III.2.2 Propriétés de traction et de flexion de biocomposites .....	76
III.3 Caractérisation physique de la fibre de jute.....	77
III.3.1 Résultats d'analyse MEB des fibres de jute .....	77
III.3.2 Résultats d'analyses spectroscopiques FTIR.....	78
III.3.3 Résultats d'analyses diffraction des rayons X (DRX).....	79
III.4 Caractérisation thermique de la fibre de jute .....	80
III.4.1 Résultats d'analyses thermogravimétrique (TGA).....	80
III.5 Conclusion .....	82

---

## CHAPITRE IV

---

Résumé.....	83
IV.1 Introduction .....	84
IV.2 Méthodologie des surfaces de réponse .....	87
IV.2.1 Principes généraux .....	88
IV.2.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse .....	88
IV.2.3.1 Planification expérimentale .....	89
IV.2.3.2 Modélisation .....	90
IV.2.3.3 Validation des modèles .....	91
IV.3 Résultats et discussions.....	94
IV.3.1 Influence des paramètres de perçage sur le facteur de délaminage .....	94
IV.3.2 Méthodologie de surface de réponse et ANOVA pour le facteur de délamination .....	95
IV.3.3 Tracés de surface 3D pour le facteur de délamination .....	99
IV.3.4 Optimisation des réponses.....	105
IV.4 Conclusion .....	109

---

## CHAPITRE V

---

Résumé.....	111
V.1 Introduction .....	112
V.2 Réseaux de neurones artificiels (ANN) .....	115
V.2.1 Calcul de la valeur prédite.....	116
V.2.2 Les neurones formels .....	117
V.2.3 Différentes fonctions de transfert.....	118
V.2.4 Perceptron simple .....	119
V.2.5 Perceptron multicouches .....	119
V.2.6 Algorithme de rétro-propagation.....	119
V.2.7 Apprentissage .....	119
V.3 Les avantages et limites des réseaux de neurones .....	120
V.4 Méthodes et techniques expérimentale .....	121

V.5 Résultats et discussions.....	121
V.5.1 Prédiction du facteur de délamination par le modèle ANN .....	121
V.5.2 Comparaison des modèles RSM et ANN .....	124
V.6 Conclusion.....	132
Conclusion général .....	133
Références .....	135

## LISTE DES FIGURES

Figure I- 1 Classification des fibres textile (naturelles et synthétiques) [17].	6
Figure I- 2 Aspect physique des plantes, des fibres naturelles qui en résultent ainsi que des fibres synthétiques, (a)-(e) graphiques en colonnes pour certaines des propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales et synthétiques [18-20].	8
Figure I- 3 structure de cellulose.	16
Figure I- 4 structure d'Hémicellulose.	16
Figure I- 5 (a) structure Lignine monomère (b) Structure typique de la lignine.	17
Figure I- 6 Structure typique de la pectine.	18
Figure I- 7 Techniques de moulage a mains.	23
Figure I- 8 Techniques de moulage ouvert pose au pistolet.	24
Figure I- 9 Procédé d'enroulement de filament.	25
Figure I- 10 Technique de moulage par compression (a) Compression moulage ouvert (b) Compression moulage fermé.	27
Figure I- 11 Processus de pultrusion.	28
Figure I- 12 Moulage des sacs à vide.	29
Figure I- 13 Moulage par transfert de résine.	30
Figure I- 14 Processus d'infusion sous vide.	31
Figure I- 15 Machine de moulage par injection (Battenfeld Maschinen, Allemagne) au Northern Alberta Institute Technology (NAIT).	32
Figure I- 16 Une seule machine de moulage par injection à vis (The Santa Clara University Design Center 1998).	32
Figure I- 17 (a) Montage expérimental d'un laser Nd-YAG, (b) zone affectée par la chaleur pour un courant de lampe de 180 ampères, une fréquence d'impulsion (30 Hz) et une pression d'air (8 bars), [168]	38
Figure I- 18 quelques types des zones endommagées lors du perçage de l'UT-JFRP (a, c) entrée, et (b, d) sortie [155].	39
Figure I- 19 Diagramme montrant un front de fissure.	41
Figure I- 20 Mécanisme de délamination dans le perçage des stratifiés composites : a) délamination par décollement et b) délamination par décollement (après [194-196]).	41
Figure I- 21 L'extrémité de la fissure montre la direction de propagation de la fissure.	42
Figure II. 1 Structure de la fibre naturelle [1].	46
Figure II. 2 Tissu en fibre de jute produit par moi-même.	49
Figure II. 3 (a) Moules utilisés pour la préparation des matériaux composites, (b) Photographie de la dalle composite, (c)(d) Photographie d'essais de perçage.	51
Figure II. 4 méthode de mesure du délaminage après le scanne de la plaque biocomposite jute/epoxy.	53
Figure II. 5 types des Trous percés sur des biocomposites en toile de jute ou en polyester pour trois essais (#3, #12 and #21) : (a) entrée, (b) sortie et dommages typiques lors du forage et (c) détermination de différents paramètres pour le calcul des facteurs de d	53
Figure II. 6 Schéma de la configuration expérimentale et mesure du facteur de délamination	60
Figure II. 7 Principe de l'essai de flexion des poutres courtes : représentation schématique des zones endommagées par cisaillement interlaminaire.	62

Figure II. 9 Appareil de Spectroscopie FTIR.....	63
Figure II. 10 Appareil de diffraction des rayons X. ....	64
Figure II. 11 Appareil DSC-TG. ....	64
Figure III. 1 (a) Données sur la résistance à la traction ultime, (b) Données sur la déformation à la rupture et (c) Données du module de Young par rapport aux données sur le diamètre pour tous les essais des fils de jute. ....	71
Figure III. 2 Analyse statistique des propriétés mécaniques de traction des fils de jute à GL = 150 mm avec comparaison pour les différentes méthodes de distribution (a) données de résistance à la traction, (b) données de déformation à la rupture, (c) données du module de Young et (d) diamètre du fil.....	73
Figure III. 3 (a–c) Distribution de Weibull à deux paramètres et (d–f) graphiques de probabilité de survie pour les propriétés mécaniques des fils de jute pour la méthode LS. ....	76
Figure III. 4 Micrographies MEB de fils de jute à (a) 130X, (b) 50 X. ....	78
Figure III. 5 Spectres FTIR pour le fibre de jute. ....	79
Figure III. 6 les diffractogrammes de rayons X le fibre jute cylindrique.....	80
Figure III. 7 Courbes thermogravimétriques des biocomposites (Epoxy/%FJ).....	81
Figure III. 8 DSC de biocomposite jute/époxy . ....	81
Figure IV. 1 Etapes de la méthodologie de surface de réponse [80].....	89
Figure IV. 2 types des Trous percés sur des biocomposites en toile de jute ou en polyester pour trois essais (#3, #12 and #21) : (a) entrée, (b) sortie et dommages typiques lors du forage et (c) détermination de différents paramètres pour le calcul des facteurs de délamination au forage et de l'image obtenue avec le logiciel Image J .....	94
Figure IV. 3 (a–c) Distribution de probabilité normale et (d–f) valeurs prévues par rapport aux valeurs réelles pour différentes méthodes $F_d$ évaluées.....	98
Figure IV. 4 Courbes de niveau pour les données prévues des différentes $F_d$ évaluées en fonction des paramètres de coupe des biocomposites produits : (a-c) données $F_{d1}$ , (d-f) données $F_{d2}$ et (g-i) données $F_{d3}$ . ....	101
Figure IV. 5 Graphiques de surface 3D du facteur de délamination pour $F_{d1}$ par rapport à $f$ , $N$ et $d$ des biocomposites élaborées (a-c) RSM. ....	101
Figure IV. 6 Graphiques de surface 3D du facteur de délamination pour $F_{d2}$ par rapport à $f$ , $N$ et $d$ des biocomposites élaborées (a-c) RSM. ....	102
Figure IV. 7 Graphiques de surface 3D du facteur de délamination pour $F_{d3}$ par rapport à $f$ , $N$ et $d$ des biocomposites élaborées (a-c) RSM. ....	103
Figure IV. 8 Graphique de la fonction de rampe de l'optimisation multi-objectif pour différentes méthodes $F_d$ évaluées (a) données $F_{d1}$ , (b) données $F_{d2}$ , (c) données $F_{d3}$ et (d) données de combinaison .....	107
Figure IV.9 Tracé de contour de la désirabilité de différentes méthodes $F_d$ évaluées.....	108

Figure V. 1 Réseau de neurones artificiels. ....	116
Figure V. 2 Topologie d'un réseau de neurones.....	117
Figure V. 3 Représentation d'un neurone formel [78]. ....	118
Figure V. 4 Différentes fonction de transfert de réseau de neurones [79]. ....	118
Figure V. 5 Processus d'apprentissage du réseau de neurones. ....	120
Figure V. 6 Architecture ANN utilisée pour (a) Fd1, (b) Fd2 et (b) Fd3. ....	122
Figure V. 7 Schéma de validation de régression des données (a-c) Fd1, (d-f) Fd2 et (g-i) Fd3. ....	123
Figure V. 8 Comparaison entre la Fd expérimentale et la Fd prévue avec les modèles RSM et ANN (a) données Fd1, (b) données Fd2 et (b) données Fd3.....	125
Figure V. 9 Comparaison entre les tracés de surface 3D du facteur de délamination pour Fd1 par rapport à f, N et d des biocomposites élaborés (a-c) RSM et (d-f) ANN modèles. ....	128
Figure V. 10 Comparaison entre les tracés de surface 3D du facteur de délamination pour Fd2 par rapport à f, N et d des biocomposites élaborés (a-c) RSM et (d-f) ANN modèles. ....	129
Figure V. 11 Comparaison entre les tracés de surface 3D du facteur de délamination pour Fd3 par rapport à f, N et d des biocomposites élaborés (a-c) RSM et (d-f) ANN modèles. ....	130
Figure V. 12 Résidus Fd pour RSM et ANN (a) données Fd1, (b) données Fd2 et (b) données Fd3....	131

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1 Propriétés physiques des fibres naturelles [16].	7
Tableau I. 2 Avantage et inconvénients des fibres naturelles.	9
Tableau I. 3 Composition chimique de quelques fibres naturelles.	9
Tableau I. 4 Comparaison des propriétés mécaniques de diverses fibres végétales prises de la littérature avec les fibres conventionnelles.	11
Tableau I. 5 Avantages et limites des matériaux à matrice polymère.	20
Tableau I. 6 Quelques travaux des biocomposites en polymères thermoplastiques et thermodurcissables renforcés par différentes fibres naturelles [77-69].	21
Tableau I. 7 Divers procédés de forage ont été signalés dans la documentation sur les CRNC.	35
Tableau I. 8 Différentes approches de mesure du délaminage des NFRC utilisées par de nombreux chercheurs.	41
Tableau II. 1 Différentes équations de mesure du facteur délamination [26–27].	54
Tableau II. 2 Plans d'expérience,	54
Tableau II. 3 Résultats expérimentaux pour le facteur de délamination des trous forés à la sortie, ...	55
Tableau II. 4 Paramètres de processus disponibles dans la littérature ouverte pour le perçage des composites polymères renforcés de fibres de jute.	56
Tableau III. 1 Résultats des propriétés mécaniques disponibles dans la littérature ouverte sur différents fils végétaux.	68
Tableau III. 2 Comparaison des propriétés de traction et de flexion des biocomposites de jute/polymère avec la littérature ouverte	77
Tableau IV. 1 Résultats expérimentaux pour le facteur de délamination des trous forés à la sortie, ..	96
Tableau IV. 2 Modèles mathématiques pour le facteur de délamination pour le forage de la biocomposites de tissu de jute/polyester.	97
Tableau IV. 3 ANOVA pour le modèle quadratique de surface de réponse pour le facteur de délamination.	104
Tableau IV. 4 Objectifs et intervalle de paramètres pour l'optimisation des conditions de coupe....	108
Tableau IV. 5 Optimisation de la réponse pour les paramètres de réponse à l'aide du RSM.....	108
Tableau IV. 6 Comparaison des techniques d'optimisation des réponses RSM, GA et fmincon. ....	109
Tableau V. 1 Essai ANN d'architectures MSE et valeur de R pour la formation, la validation et les essais de Fd1, Fd2 et Fd3.....	124
Tableau V. 2 Modèles mathématiques pour différents facteurs de délamination Fd pour le forage de tissu de jute / polyester biocomposite obtenu avec la méthode ANN. ....	126
Tableau V. 3 Comparaison entre l'approche RSM et ANN pour différents Fd.....	127

# NOMENCLATURE ET ABREVIATIONS

---

## *Abréviations*

AWJM : Usinage par jet d'eau abrasif (Abrasive Water Jet Machining)

AWJ : Jet d'eau abrasif (Abrasive Water Jet)

ANN : Réseau neuronal artificiel

ANFIS : Système d'inférence floue neuronal adaptatif (Adaptive Neural Fuzzy Inference System)

ANOVA : Analyse de variance (Analyze Of Variance)

BBD : Conception en Box-Behken

BSD : Forets à brad et à éperon (Brad and Spur Drills)

CFRP : Plastiques renforcés de fibres de carbone

CF : Fibre de carbone

CMP : Composites à matrice polymère

CMC : Composites à matrice céramique

CMM : Composites à matrice métallique

CNC : Centre d'usinage vertical

CF : Force de poussée

CCD : Plan composite central

DSC : Calorimétrie à balayage différentiel (Differential scanning calorimetry)

DF : Facteur de délaminage

EBJWC : Noyau en liège aggloméré avec peaux époxy renforcées par du jute tissé

FGNF : Fibres naturelles à gradient fonctionnel

FRPC : Composites polymères renforcés de fibres

GA : Algorithme génétique

HDPE : Polyéthylène haute densité

HIPS : Polystyrène à haut impact

HAZ : La zone affectée par la chaleur

HSS-TiN : Acier rapide

JFCE : Matrice époxy renforcée de fibres bidirectionnelles en jute et en liège

MEB : Microscopie Electronique à Balayage  
MPL : Le perceptron multicouche (l'accessibilité au perceptron multicouche)  
MS : Carré moyen (Mean Square)  
NFRC : Composites polymères renforcés de fibres naturelles  
NFC : Composite de fibres naturelles  
PP : Polypropylène  
PALF : Fibre de feuilles d'ananas (Pineapple leave fibre)  
PLA : Acide polylactique  
PEG : polyéthylène glycol  
PE : Polyethylene  
PS : Polystyrene  
PVC : Polyvinyl chloride  
PU : Polyurethane  
PRESS : Erreur résiduelle prédite de la somme des carrés  
RSF : Fibre de paille de riz (Rice Straw Fiber)  
RTM : Moulage par transfert de résine  
RSM : Méthodologie de surface de réponse  
RNA : Réseaux de neurones artificiels  
RMSE : L'erreur RMS  
RBF : Les réseaux à fonction de base radiale  
STEP : Station d'épuration des eaux usées  
SS : La somme des carrés (Sum of Squares)  
UV : Ultra-violet  
WC : Carbure de tungstène  
WJF : Fibres de jute tissées (Woven Jute Fibers)

### ***Symboles latins***

NaOH : Hydroxyde de sodium  
Ca(OH)<sub>2</sub> : Hydroxyde de calcium  
Na<sup>+</sup> : L'ion sodium

$X$  : Matrice de terme de modèle évalué aux points de conception

$R^2$  : Le coefficient de détermination statistique

$R^2_{adj}$  : Le coefficient de détermination ajusté

$F_d$  : Facteur du délaminage

$D_{max}$  : Diamètre maximal du trou

$D$  : Diamètre initial du trou

$W_{max}$  : Largeur maximale de la zone endommagée

$W$  : Largeur initiale de la zone endommagée

$A_{max}$  : Surface maximale du trou

$A_{trou}$  : Surface initiale du trou

$d$  : Diamètre du foret

$N$  : Vitesse de coupe

$f$  : Vitesse d'avance

dpi : Point par pixel

$L$  : Réseau orthogonal

$E$  : Module de Young de traction (MPa) ou bien (GPa).

$T_g$  : Température de transition vitreuse

### ***Symboles grecs***

$\varepsilon$  : Déformation à la rupture en traction (%).

$\sigma$  : Contrainte à la rupture de traction (MPa).

## Résumé

Ces dernières années, les biocomposites de fibres naturelles ont attiré une importance considérable en tant que matériau structurel potentiel. Les caractéristiques attractives des fibres naturelles comme le jute, le sisal, le coir et la banane ont été leur faible coût, poids légers, module spécifique élevé, renouvelable et biodégradable. Les fibres naturelles sont de nature lignocellulosique. Ces biocomposites gagnent en importance en raison de leur nature non cancérigène et biodégradable. Les biocomposites de fibres naturelles peuvent être des matériaux très rentables, en particulier pour le bâtiment et l'industrie de la construction. Dans de nombreux cas l'utilisation actuelle du jute est principalement comme un combustible dans les fours du moulin à sucre ; on estime que la valeur de ce résidu agricole peut être augmentée par collage avec de la résine pour produire des composites adaptés aux matériaux de construction.

Dans cette optique, les travaux actuels ont été entrepris pour développer un composite à matrice polymère (résine époxy) utilisant de la fibre de jute comme renfort et pour étudier ses propriétés mécaniques et ses performances environnementales. Les composites sont préparés avec différents taux de fibres de jute. Ce travail de thèse porte sur la modélisation et l'optimisation des processus d'usinage d'une structure stratifiée constituée d'une matrice époxy renforcée de fibres bidirectionnelles en jute par la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN). Les méthodes classiques sont particulièrement coûteuses en termes de temps de calcul et apparaissent divergentes pour des problèmes comportant de nombreux paramètres à gérer. Par conséquent, notre contribution consiste à développer une méthode de modélisation et d'optimisation plus rapide et plus efficace. Au cours de cette étude, il est apparu que l'approche ANN a un grand potentiel pour modéliser des relations complexes à décrire avec des modèles mathématiques simples. De plus, cette approche est particulièrement rapide et peut être générée en parallèle. Par ailleurs, les résultats obtenus sont d'une qualité satisfaisante. Ces travaux ouvrent des perspectives plus prometteuses qui pourront être valorisées dans des applications diverses.

## **Abstract**

In recent years, natural fiber biocomposites have attracted considerable importance as a potential structural material. The attractive characteristics of natural fibers like jute, sisal, coir and banana have been their low cost, light weight, high specific modulus, renewable and biodegradable. Natural fibers are lignocellulosic in nature. These biocomposites are gaining importance due to their non-carcinogenic and biodegradable nature. Natural fiber biocomposites can be very cost-effective materials, especially for the building and construction industry. In many cases the current use of jute is primarily as fuel in sugar mill kilns; it is believed that the value of this agricultural residue can be increased by bonding with resin to produce composites suitable for building materials.

With this in mind, current work has been undertaken to develop a polymer matrix composite (epoxy resin) using jute fiber as reinforcement and to study its mechanical properties and environmental performance. The composites are prepared with different rates of jute fibres. This thesis work focuses on the modeling and optimization of machining processes of a laminated structure consisting of an epoxy matrix reinforced with bidirectional jute fibers by response surface methodology (RSM) and artificial neural networks. (ANN). Classical methods are particularly expensive in terms of computation time and appear divergent for problems involving many parameters to manage. Therefore, our contribution is to develop a faster and more efficient modeling and optimization method. During this study, it appeared that the ANN approach has a great potential to model complex relationships to be described with simple mathematical models. Moreover, this approach is particularly fast and can be generated in parallel. Furthermore, the results obtained are of satisfactory quality. This work opens more promising perspectives that can be exploited in various applications.

## ملخص

في السنوات الأخيرة ، اكتسبت المركبات الحيوية من الألياف الطبيعية أهمية كبيرة كمواد هيكلية محتملة. كانت الخصائص الجذابة للألياف الطبيعية مثل الجوت والسيزال وجوز الهند والموز هي التكلفة المنخفضة والوزن الخفيف والمعامل النوعي العالي والمتجددة والقابلة للتحلل. الألياف الطبيعية هي لجنوسليلوز في الطبيعة. تكتسب هذه المركبات الحيوية أهمية بسبب طبيعتها غير المسببة للسرطان والقابلة للتحلل. يمكن أن تكون المركبات الحيوية من الألياف الطبيعية مواد فعالة للغاية من حيث التكلفة ، خاصة في صناعة البناء والتشييد. في كثير من الحالات يكون الاستخدام الحالي للجوت في المقام الأول كوقود في أفران مصانع السكر ؛ يُعتقد أنه يمكن زيادة قيمة هذه المخلفات الزراعية عن طريق الارتباط بالراتنج لإنتاج مركبات مناسبة لمواد البناء.

مع وضع ذلك في الاعتبار ، تم تنفيذ العمل الحالي لتطوير مركب مصفوفة بوليمر (راتنجات الايبوكسي) باستخدام ألياف الجوت كتعزيز ودراسة خصائصه الميكانيكية وأدائه البيئي. يتم تحضير المواد المركبة بمعدلات مختلفة من ألياف الجوت. تركز هذه الأطروحة على نمذجة وتحسين عمليات تصنيع هيكل مغلف يتكون من مصفوفة إيبوكسي معززة بألياف الجوت ثنائية الاتجاه من خلال منهجية سطح الاستجابة (RSM) والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN). تعتبر الطرق الكلاسيكية باهظة الثمن بشكل خاص من حيث وقت الحساب وتبدو متباينة بالنسبة للمشكلات التي تتضمن العديد من المعلمات التي يجب إدارتها. لذلك ، تتمثل مساهمتنا في تطوير طريقة نمذجة وتحسين أسرع وأكثر كفاءة. خلال هذه الدراسة ، اتضح أن نهج ANN لديه إمكانات كبيرة لنمذجة علاقات معقدة يمكن وصفها بنماذج رياضية بسيطة. علاوة على ذلك ، فإن هذا النهج سريع بشكل خاص ويمكن إنشاؤه بالتوازي. علاوة على ذلك ، فإن النتائج التي تم الحصول عليها ذات جودة مرضية. يفتح هذا العمل المزيد من الآفاق الواعدة التي يمكن استغلالها في مختلف التطبيقات.

# **Introduction**

## **générale**

## Introduction général

Les matériaux à base de polymères époxy occupent une place importante dans la recherche sur les matériaux dans le domaine du développement des composites. Ces composites présentent de nombreux avantages en raison de leur faible coût, faible densité, d'excellentes propriétés mécaniques, d'une résistance élevée à l'usure, à la corrosion et à la résistance électrique.

La plupart des structures composites renforcées de fibres naturelles, connues sous le nom de composites de fibres naturelles (CFN), sont apparues comme une alternative aux composites à base de fibres synthétiques telles que les polymères renforcés de fibres de verre (PRV). En fait, les CFN sont un bon marché, léger, respectueux de l'environnement, résistant à l'usure, renouvelable, recyclable et biodégradable. De plus, ces matériaux contiennent des fibres naturelles telles que le chanvre, le jute et le coton, qui offrent d'excellentes propriétés acoustiques. La fibre de jute apparaît comme la plus résistante, tout en étant très peu coûteuse et abondamment disponible sur le marché.

La plupart des pièces composites sont fabriquées à l'échelle industrielle, mais un usinage est souvent nécessaire pour les assembler dans la structure de la pièce principale. Le perçage est le procédé d'usinage le plus couramment utilisé dans l'industrie pour assembler des pièces mécaniques. Par conséquent, dans l'industrie aérospatiale, de nombreux panneaux et composants structurels ont des trous de montage conçus pour accepter des vis ou des rivets de montage. Cependant, ce processus d'usinage s'accompagne souvent de dommages consécutifs tels que la déchirure ou la rupture des fibres, la fissuration de la matrice et le délaminage.

En effet, le délaminage est le principal défaut que le perçage peut causer. Compte tenu de cette situation, diverses études expérimentales ont été réalisées pour évaluer l'effet des paramètres de traitement sur l'exfoliation. Par conséquent, on peut voir que le facteur de délaminage et la rugosité de surface dépendent principalement des paramètres de coupe lors du processus de forage des composites. Néanmoins, peu d'attention a été accordée à la qualité des trous et à l'impact des paramètres des trous dans les composites renforcés de fibres naturelles (NFRP).

La présente étude de recherche est divisée en cinq chapitres principaux répartis comme suit :

Le premier chapitre présente des recherches bibliographiques et des informations générales sur les fibres naturelles et leur rôle en tant qu'agents de renforcement. Basé sur une revue de la littérature, ce chapitre présente également des méthodes de traitement des fibres naturelles. Ensuite, nous abordons les principales propriétés mécaniques et hygroscopiques et la technologie de fabrication des biocomposites à base de fibres végétales, les principaux avantages de ces fibres comme renfort des composites et l'usinage des biocomposites, sans oublier les inconvénients. Ensuite, l'art antérieur est réalisé où certains résultats de recherche publiés dans la littérature sont présentés.

Les techniques expérimentales ainsi que les analyses thermo-physico-chimiques des composites polymères renforcés de fibres de jute sont exposées dans le second et le troisième chapitre, accompagnées des résultats de chaque analyse.

Le quatrième chapitre traite l'analyse des résultats des essais de perçage des structures biocomposites usinées. Nous avons déterminé les modèles mathématiques de délaminage (Fd) à la sortie du trou usiné en appliquant la Méthodologie de Surface de Réponse (RSM) pour mettre en évidence la relation entre les paramètres de coupe, à savoir la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe. Les modèles ont été développés à partir d'un plan factoriel complet de 27 essais. Les deux approches ont été comparées en termes de coefficient de détermination ( $R^2$ ). On a également comparé les résultats obtenus avec ceux de la littérature pour mieux comprendre le comportement de ces structures.

Le dernier chapitre présente la démarche de développement d'un programme basé sur des réseaux de neurones artificiels à l'aide de la boîte à outils pour réseaux neuronaux de MATLAB.

Enfin, nous présentons les conclusions générales de l'étude détaillées à la lumière des résultats obtenus et nous proposons un certain nombre de recommandations qui devraient être prises en compte dans les études futures pour une utilisation plus efficace de ce matériau.

# Chapitre I

GENERALITE ET ETAT DE  
L'ART : BIOFIBRES ET  
PROCEDES DE MISE EN  
FORME

# Chapitre I.

Contenu du chapitre	Page
I.1 Introduction .....	3
I.2 Fibres naturelles et leur rôle en tant que renfort.....	4
I.3 Méthodes de traitement des fibres naturelles.....	12
I.3.1 Traitement alcalin.....	12
I.3.2 Traitement par l'acétone.....	13
I.3.3 Traitement par benzylation.....	13
I.4 Traitement d'estérification.....	14
I.4.1 Réaction d'acétylation.....	14
I.5 Traitement au permanganate .....	14
I.6 Autres traitements chimiques .....	14
I.7 Compositions chimiques et propriétés physiques des fibres naturelles .....	15
I.7.1 Cellulose .....	15
I.7.2 Hémicellulose .....	16
I.7.3 Lignine .....	17
I.7.4 pectine.....	17
I.8 Modifications de la surface des fibres naturelles .....	18
I.9 Composites / Biocomposites .....	18
I.9.1 Composites à matrice polymère (CMP).....	19
I.9.2 Avantages de l'utilisation de composites à base de fibres naturelles .....	20
I.10 Techniques de fabrication de biocomposites.....	21
I.10.1 Technique de moulage ouvert.....	23
I.10.1.1 Pose à la main.....	23
I.10.1.2 Pose au pistolet .....	24
I.10.1.3 Enroulement de filament .....	24
I.10.2 Technique de moulage fermé.....	25
I.10.2.1 Moulage par compression.....	26
I.10.2.2 Pultrusion .....	27
I.10.2.3 Moulage du sac sous vide.....	28
I.10.2.4 Moulage par transfert de résine (MTR).....	29
I.10.2.5 Traitement de perfusion sous vide.....	30
I.10.2.6 Le moulage par injection .....	31
I.10.2.7 Extrusion.....	33
I.11 Usinage des biocomposites .....	33
I.11.1 Techniques de perçage.....	34
I.11.1.1 Perçage mécanique conventionnel .....	35
I.11.1.2 Méthodes de perçage non conventionnelles .....	36
I.11.2 Paramètres du perçage .....	37
I.11.3 Mesures des paramètres de performance du perçage .....	39
I.11.3.1 Délaminage.....	39
I.12 Désossage et retrait des fibres .....	42
I.12.1 Microchargement matriciel.....	43

I.12.2 Fracture de la fibre .....	43
I.13 Conclusion .....	43

## I.1 Introduction

À l'heure actuelle, l'utilisation de fibres naturelles pour renforcer les composites présente de nombreux avantages intéressants, en particulier la réduction des matières d'origine non renouvelable et la réduction de l'impact sur l'environnement. Des recherches approfondies sont menées pour mettre au point des biocomposites qui combinent des fibres naturelles avec des polymères biodégradables. L'un des principaux avantages de ces biocomposites est que celles-ci sont complètement dégradables et durables. De plus, ces composés ont de nombreuses propriétés et peuvent concurrencer les polymères non biodégradables dans différents domaines industriels. Les matériaux composites sont largement utilisés de nos jours pour des applications quotidiennes et en même temps, ils jouent un rôle essentiel dans la fabrication de machinerie et de matériel hautement sophistiqués. Les matériaux composites sont plus avantageux que les matériaux conventionnels, comme un procédé de fabrication léger, simple et bon marché, ainsi que des propriétés comparables de leurs constituants [1]. La tâche essentielle des chercheurs est donc d'améliorer les propriétés des matériaux composites selon l'application et de les rendre plus durables, légers et rentables.

Composites consistent en deux phases un est appelé phase discrète appelée matériau de renforcement, qui peut être fibre, particules ou flocons et l'autre est une phase continue appelée matériau matriciel qui possède la plus grande partie du matériau composite. Dans un matériau composite, des composants tels que des matrices et des fibres sont reliés ensemble, mais sa principale différence avec un alliage est que ses composants garderont leur identité et leurs propriétés [2]. Lors de la définition d'un composite, il s'agit d'une combinaison unique de fibre et de matrice, la fonction de la fibre est de résister aux contraintes et de rendre le composite plus rigide, et la matrice est le liant qui maintient les fibres en place [3].

Les matériaux composites présentent des avantages tels qu'un poids léger, une faible densité, un faible coût et d'excellentes propriétés telles que la résistance à la traction, la résistance à la flexion et la résistance aux chocs. Il peut être utilisé pour des applications où le poids total de l'équipement est un problème critique, telles que la Technologie des fusées, industrie aérospatiale, construction navale, etc. Associés à l'isolation thermique, les composites peuvent également être utilisés comme isolant thermique et électrique. Les matériaux composites sont utilisés pour fabriquer de nombreuses pièces mécaniques telles

que les freins, les arbres de transmission, les volants d'inertie et les réservoirs sous pression [4].

## I.2 Fibres naturelles et leur rôle en tant que renfort

L'attrait de l'utilisation de fibres synthétiques dans les composites polymères diminue car elles sont chères et non biodégradables. D'autre part, la conscience environnementale d'aujourd'hui motive les chercheurs du monde entier à étudier les composites polymères renforcés de fibres naturelles comme une alternative rentable aux composites renforcés de fibres synthétiques. La disponibilité et la facilité de fabrication des fibres naturelles ont conduit les chercheurs à expérimenter des fibres disponibles localement et peu coûteuses pour déterminer leur faisabilité à des fins de renforcement et les spécifications requises pour un excellent renforcement en polymère composite pour une variété d'applications. Propriétés mécaniques spécifiques élevées, sont une alternative renouvelable et biodégradable aux renforts synthétiques les plus courants tels que les fibres de verre. Les fibres naturelles nécessitent peu d'énergie pour leur production et, en raison de leur pouvoir calorifique élevé, peuvent être incinérées en fin de vie pour une valorisation énergétique. Toutes les fibres végétales consomment du dioxyde de carbone au cours de leur croissance et peuvent être considérées comme naturelles. Cela signifie qu'il peut être brûlé en fin de vie sans libérer de CO<sub>2</sub> supplémentaire dans l'atmosphère [5]. Le terme "fibres naturelles" comprend une large gamme de fibres végétales, animales et minérales. Cependant, dans l'industrie des composites, il s'agit principalement de fibres de bois et de fibres de feuilles, de graines et de tiges. Ces fibres contribuent souvent de manière significative à la performance structurelle des plantes et peuvent fournir un renforcement significatif lorsqu'elles sont utilisées dans des composites plastiques.

Malgré l'intérêt et l'attrait environnemental des fibres naturelles, leur utilisation est limitée aux applications non extractibles en raison de leur plus faible résistance par rapport aux composites polymères renforcés de fibres synthétiques. Le manque de rigidité et de résistance des biocomposites peut être surmonté par une configuration structurelle et un meilleur placement dans le sens où les fibres sont placées à des endroits spécifiques pour des performances de résistance plus élevées. En conséquence, des recherches approfondies ont été menées sur la fabrication et les propriétés des composites à matrice polymère (CMP), remplaçant les fibres synthétiques par des fibres naturelles telles que le jute, le sisal, l'ananas, le bambou, le kénaf et la bagasse [6-9]. Ces fibres végétales présentent de nombreux avantages par rapport aux fibres de verre et aux fibres de carbone, telles que renouvelables,

écologiques, peu coûteuses, légères et à hautes performances mécaniques spécifiques. L'innovation technologique accrue, l'identification de nouvelles applications, les pressions politiques et environnementales continues et les investissements gouvernementaux dans de nouvelles technologies de récolte et de traitement des fibres devraient continuer à accroître l'utilisation des fibres naturelles dans les composites.

Parmi ces fibres, on distingue trois grandes divisions (figure I.1), à savoir, [11].

- Les minéraux formés de chaînes cristallines allongées peuvent être classés dans les catégories suivantes : amosite, crocidolite, trémolite, actinolite et anthophyllite.
- Les fibres végétales qui ont une nature cellulosique [12]. Les fibres naturelles d'origine végétale peuvent être classées en fonction de la partie, ou du type, de la plante dont elles sont extraites, comme le montre la figure I.1. Ces fibres comprennent les fibres lignocellulosiques car la majorité d'entre elles contiennent de la lignine dans leur structure [13-16] et un polymère polyphénolique naturel.
- Fibres animales comprennent généralement des protéines ; les exemples incluent la soie, la laine, le crin de cheval et le crin d'alpaga.

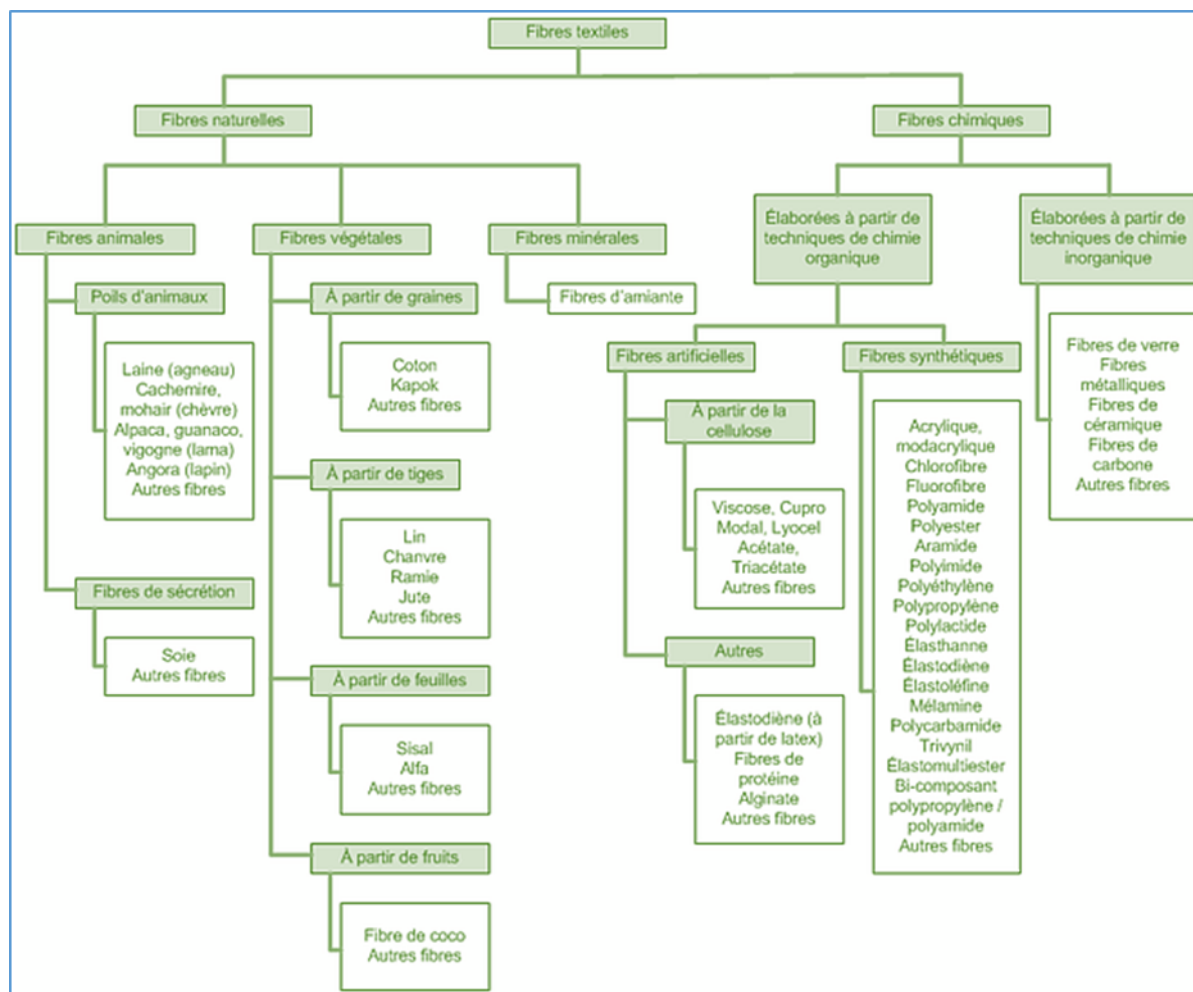


Figure I.1 Classification des fibres textile (naturelles et synthétiques) [17].

Les fibres sont généralement divisées en deux principaux groupes, les fibres naturelles et les fibres synthétiques. Les fibres synthétiques ont un module, une résistance et une élasticité élevés et sont également de nature hydrophobe. Cependant, les fibres naturelles attirent aujourd'hui beaucoup d'attention en raison de leur faible coût, de leur résistance comparable aux fibres synthétiques, de leur faible densité, de leur non-toxicité et de leur biodégradabilité. Selon la disponibilité, les fibres naturelles sont réparties dans les catégories suivantes :

Poils de graines, fibres libériennes, fibres de feuilles. Quelques exemples sont le coton (poils de graines), la ramie, le jute, le lin (fibre de baste), le sisal et l'abaca (fibre de feuille). Parmi ces fibres, le jute, la ramie, le coco, le lin, le sisal, le chanvre, etc. sont les plus couramment utilisés pour la production de composites à matrice polymère. Le tableau I.1 montre les propriétés physiques de ces fibres naturelles. L'un des principaux inconvénients des fibres naturelles est leur comportement hydrophile. En tant que tel, il a tendance à absorber l'humidité de l'atmosphère, ce qui entraîne des changements de dimensions et de

propriétés. Un autre défi majeur lors de l'utilisation de fibres naturelles est leur faible compatibilité avec les polymères. Pour améliorer la compatibilité avec la matrice naturelle, les fibres peuvent subir divers traitements de modification de surface tels que le traitement alcalin, l'acétylation, la cyanoéthylation et le blanchiment.

Tableau I.1 Propriétés physiques des fibres naturelles [16].

Propriétés	Unité	Coco	Lin	Chanvre	Jute	Ramie	Sisal
Densité	g/m <sup>3</sup>	1.25 -1.5	1.4	1.48	1.45	1.5	1.26-1.33
Diamètre	µm	100-450	100	25	60	40-50	100-300
Contenu en cellulose	%	36-43	62-72	67-75	59-71	68-76	60-67
Contenu en hémicellulose	%	0.2	16-18	16-18	12-13	13-14	10-13.9
Contenu en lignine	%	41-45	2-2.5	2.8-3.3	11.8-12.9	0.6-0.7	8-12
Angle du microfibrillaire	deg	30-45	10	6.2	7-9	7.5-12	10-20
Résistance à la traction	Mpa	105-175	800-1500	550-900	400-800	500-870	600-700
Module de Young	Gpa	4-6	60-80	70	10-30	44	38
Allongement à la rupture	%	17-47	1.2-2.4	1.6	1.16-1.8	1.2	3.64-5.12
Absorption d'humidité	%	10	7	8	12	12-17	11

La figure I.2 montre certaines gammes de fibres et procédures de classification courantes. Pour les applications techniques, il est important de prendre en compte la rigidité et la résistance. Leurs propriétés de traction absolues sont présentées par la figure I.2(a). Comme mentionné précédemment, les fibres libériennes telles que le lin, le chanvre et le jute sont les meilleures en termes de rigidité et de résistance à la traction. Le deuxième type est constitué

de fibres gélatineuses. Cependant, il a un faible MFA (Microfibrillar Angle) et une très faible teneur en lignine. Les principaux facteurs affectant les propriétés mécaniques des fibres végétales sont la teneur en cellulose et l'MFA. De plus, en raison de l'hydrophilie des glucides qui composent les parois cellulaires, les fibres végétales sont également sensibles à l'humidité, ce qui affecte les propriétés mécaniques et les dimensions des fibres. Toutes les fibres végétales sont naturellement lignocellulosiques et comprennent la cellulose, l'hémicellulose, la lignine, la pectine et la cire, à l'exception des fibres de coton.

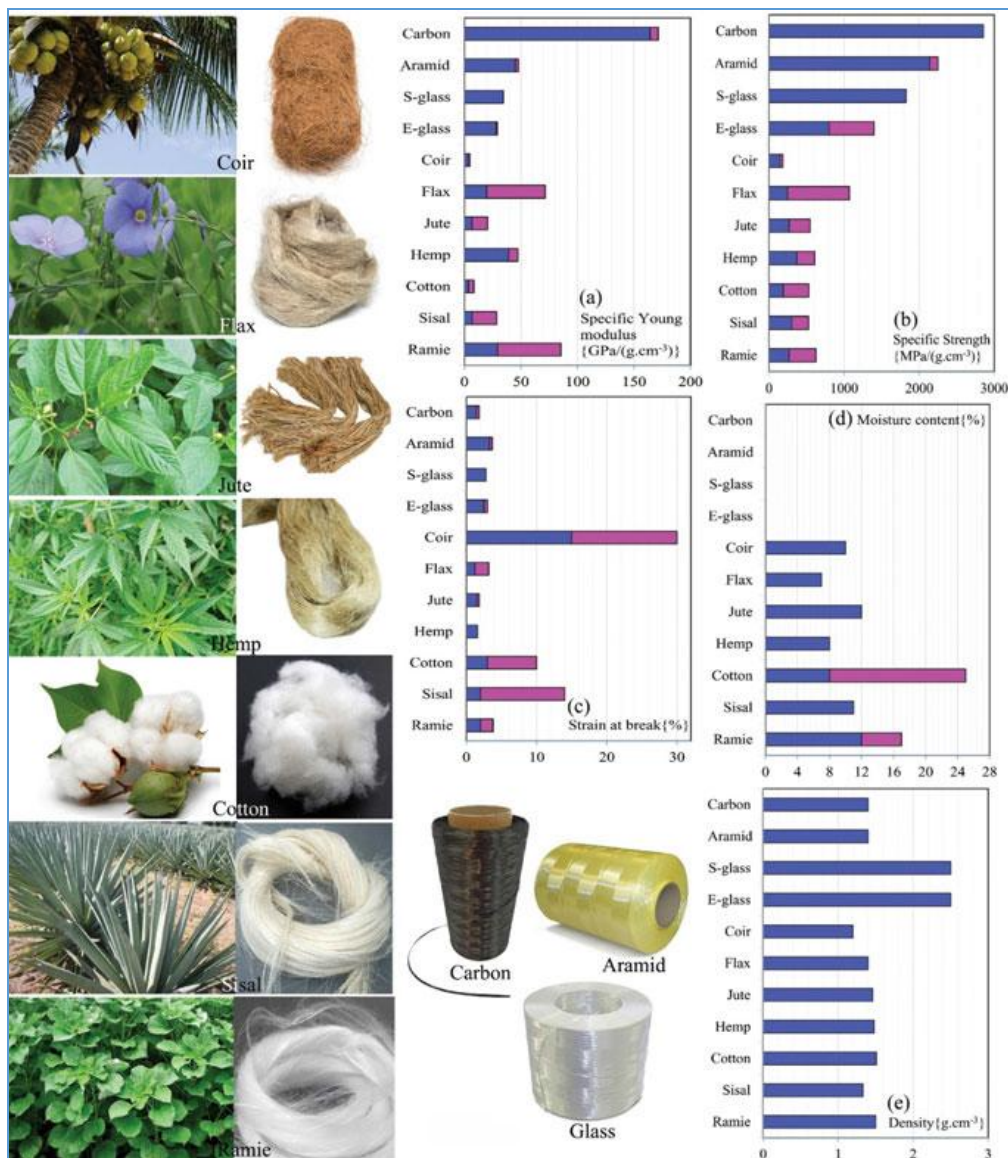


Figure I.2 Aspect physique des plantes, des fibres naturelles qui en résultent ainsi que des fibres synthétiques, (a)-(e) graphiques en colonnes pour certaines des propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales et synthétiques [18-20].

La composition chimique de certaines fibres végétales est présentée dans le [tableau I.3](#). Les fibres lignocellulosiques sont classées en sept groupes selon leur origine, Une matrice contenant des fibres de cellulose comme agent de renforcement [23].

**Tableau I.2** Avantages et inconvénients des fibres naturelles.

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
• Des ressources provenant de sources renouvelables	○ Faible résistance biologique - attaqué par les champignons et les bactéries.
• Abondantes	○ Nécessite généralement une faible température de traitement afin d'être façonné en matériaux souhaitables.
• Propriétés mécaniques souhaitables	○ Coefficient de dilatation thermique élevé
• Résistance spécifique élevée	○ Les propriétés physiques des fibres naturelles varient selon la saison de récolte et la région.
• Faible coût	○ Les propriétés dépendent du processus de récolte, de la localité et de la maturité de la plante.
• Légèreté	
• Comportement flexible	
• Biodégradable	
• Non-abrasif	
• Faible conductivité thermique	
• Non magnétique et non conducteur	
• Sans danger pour l'environnement et non toxique	
• Propriétés uniques d'isolation acoustique et thermique	

**Tableau I.3** Composition chimique de quelques fibres naturelles.

Type de fibre	Cellulose (%)	Hemicelluloses (%)	Lignin (%)	Pekin (%)
Lin	64,1-71,9	16,7-20,6	2,0-2,2	1,8-2,3
Chanvre	70,2-74,4	17,9-22,4	3,7-5,7	0,9
Jute	61-71,5	12,0-20,4	11,8-13	0,2

<b>Kénafe</b>	31-57	21,5	8-19	3-5
<b>Ramie</b>	68,6-76,2	13,1-16,7	0,6-0,7	1,9
<b>sisal</b>	65,8-78	8-14	10-14	0,8-10
<b>Henequen</b>	77,6	4-8	13,1	-
<b>Ananas</b>	70-82	-	5-12,7	-
<b>Banane</b>	63-64	10-19	5	-
<b>Bambou</b>	33-45	30	20-25	-
<b>Piaçava</b>	31,6	-	48,4	-
<b>Paille de riz</b>	51-70	-	12-16	-
<b>Abaca</b>	70	22	6	-
<b>SCF *</b>	79,7	10,13	3,8	-
<b>canne à sucre</b>	54,3-55,2	16,8-29,7	25,3-24,3	-
<b>coton</b>	82,7-90	5,7		0-1
<b>coco</b>	32-43	0,15-0,25	40-45	3-4
<b>Luffa cylindrica</b>	63,0	19,4	11,2	-

\*fibre de *Sansevieria cylindrica*.

1. Fibres de racine, telles que : jute, lin, chanvre, ramie, kenaf et roselle.
2. Fibres de fruits telles que le coco et le palmier à huile.
3. Fibres d'herbes/de graines comme le bambou, la bagasse, le maïs, le sabai, le colza, l'herbe à éléphant, l'alfa et le canari.
4. Fibres de feuilles telles que l'ananas, le sisal, le bananier, l'abaca, l'henequen, l'agave et le raphia.
5. Fibres de graines contenant du coton, du kapok, de l'asclépiade et du loofah
6. Fibres provenant de la tige comme le blé, le maïs, l'avoine, le riz et le seigle.
7. Fibres de bois composées de bois dur et de bois tendre

**Tableau I.4** Comparaison des propriétés mécaniques de diverses fibres végétales prises de la littérature avec les fibres conventionnelles.

<b>Fibres</b>	<b>Densité (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\epsilon</math> (%)</b>	<b><math>\sigma</math> (MPa)</b>	<b>E (GPa)</b>
<b>Cotton</b>	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6
<b>Jute</b>	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
<b>Lin</b>	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6
<b>Chanvre</b>	-	1,6	690	-
<b>Ramie</b>	-	3,6-3,8	400-938	61,4-128
<b>Sisal</b>	1,5	2,0-2,5	511-635	9,4-22,0
<b>Coco</b>	1,2	30,0	175	4,0-6,0
<b>Curauá</b>	1,4	3,7-4,3	500-1150	11,8
<b>Abaca</b>	1,5	3-10	980	12
<b>Raphia farinifera</b>	-	4	500	12,3
<b>canne à sucre</b>	-	1,1	222	27,1
<b>Banane</b>	-	-	700-800	27-32
<b>Ananas</b>	-	3,2	180	82
<b>Piassava</b>	-	6,4-21,9	9108,5- 147,3	1,07-4,59
<b>E-verre</b>	2,5	2,5	2000-3500	70,0
<b>S-verre</b>	2,5	2,8	4570	86,0
<b>Aramide (normal)</b>	1,4	3,3-3,7	3000-3150	63,0-67,0
<b>Carbone standard</b>	1,4	1,4-1,8	4000	230,0- 240,0

Les différences de composition chimique et de propriétés physiques conduisent à un large éventail de propriétés dans les fibres végétales [24].

D'après le [tableau I.3](#), nous pouvons voir que les glucides, avec la lignine, sont les principaux composants de la matière lignocellulosique. La cellulose et l'hémicellulose sont les principaux composants des parois cellulaires végétales [\[22\]](#). Dans les fibres lignocellulosiques, la pectine agit comme un adhésif, liant les fibres entre elles et les maintenant dans un matériau non fibreux. Parmi les matériaux lignocellulosiques, l'hémicellulose, la pectine et la lignine jouent un rôle essentiel.

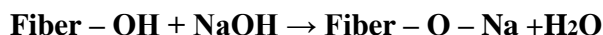
### I.3 Méthodes de traitement des fibres naturelles

Le traitement des composites plastiques avec des fibres naturelles comme renfort a considérablement augmenté ces dernières années [\[25-28\]](#). Le développement de composites renforcés de fibres naturelles nécessite une meilleure compréhension de la composition chimique et de la liaison de surface des fibres naturelles. La liaison entre les fibres de renfort et la matrice de résine est un facteur clé dans l'amélioration des propriétés mécaniques des composites. Plusieurs auteurs [\[29-30\]](#) l'ont reconnu et ont concentré leurs recherches sur le traitement des fibres pour améliorer leur liaison avec la matrice de résine. Les propriétés mécaniques des composites sont contrôlées par les propriétés et les quantités de chaque composant et les propriétés de la région d'interface entre la matrice et le renfort. L'absence d'une bonne adhérence interfaciale rend l'utilisation de composites en fibres de cellulose moins attrayante. Dans de nombreux cas, les propriétés d'interface entre les fibres et la matrice polymère sont médiocres en raison de la nature hydrophile des fibres naturelles, ce qui les rend moins susceptibles d'être utilisées comme agents de renforcement. Par conséquent, des modifications chimiques ont été explorées pour optimiser l'interface des fibres. Divers traitements chimiques sont disponibles pour modifier la surface des fibres. Les traitements chimiques comprenant les alcalis, les silanes, l'acétylation, la benzylation, l'acrylate, l'isocyanate, les agents de couplage maléiques et le traitement au permanganate [\[31\]](#).

#### I.3.1 Traitement alcalin

Le traitement alcalin ou mercerisations est l'un des traitements chimiques les plus couramment utilisés pour renforcer les thermoplastiques et les thermodurcissables. Une modification clé provoquée par le traitement alcalin est la rupture des liaisons hydrogène dans la structure du réseau, augmentant ainsi la rugosité de surface. Ce traitement élimine une partie de la lignine, de la cire et de l'huile recouvrant la surface externe de la paroi cellulaire de la fibre, dépolymérise la cellulose et expose de courtes cristallites [\[32\]](#). L'ajout

d'une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (NaOH) aux fibres naturelles favorise l'ionisation des groupes hydroxyle en alcoxydes [33].



Ainsi, le traitement alcalin influence directement la fibrille cellulosique, le degré de polymérisation et l'extraction de lignine et de composés hémicellulose [34].

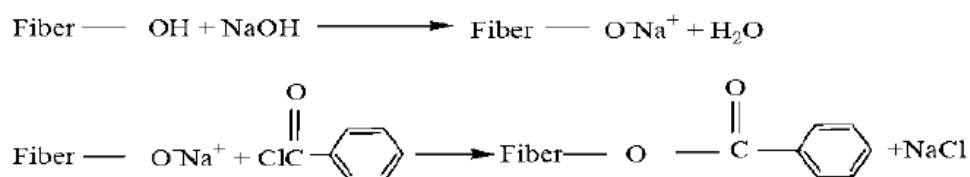
Par conséquent, le traitement alcalin a un effet durable sur le comportement mécanique de la fibre de lin, en particulier sur la résistance et la rigidité des fibres.

### I.3.2 Traitement par l'acétone

Lorsque les fibres sont traitées à l'acétone, des substances telles que la lignine, la cellulite, etc. se dissolvent dans l'acétone. L'acétone est un solvant organique, elle a donc tendance à dissoudre les composants organiques non polaires. Les enveloppes de riz ont été lavées dans un extracteur soxhlet avec de l'acétone pendant environ 1 à 1,5 h. L'acétone a été évaporée (bouillie à 630 C) et condensée dans le volume avec les fibres. Ce processus a été répété quatre fois pour chaque lot. L'acétone usagée a été jetée avant que le nouveau lot soit nettoyé de la même façon. L'acétone est passée de transparente à vert clair après le traitement en raison de la présence de cires et de matières organiques après l'extraction. Toutes les fibres ont été lavées à l'eau sous pression à température ambiante pendant 10 minutes avant le traitement à l'acétone. Les fibres ont ensuite été séchées à température ambiante pendant 24 heures.

### I.3.3 Traitement par benzylation

La benzylation est une transformation importante dans la synthèse organique [35]. Le chlorure de benzoyle est le plus couramment utilisé dans le traitement des textiles. Le chlorure de benzoyle comprend le benzoyle ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{C}=\text{O}$ ). Ceci est attribué à la diminution de l'hydrophilie des fibres traitées et à l'interaction accrue avec la matrice polymère hydrophobe. La réaction entre le groupe hydroxyle cellulosique de la fibre et le chlorure de benzoyle sont donnés comme suit :

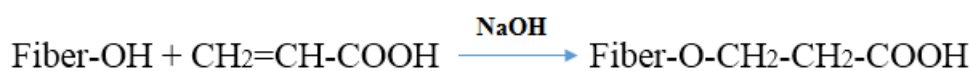


La benzylation des fibres améliore l'adhérence de la matrice fibreuse, augmente considérablement la résistance du composite, réduit l'absorption d'eau et améliore la stabilité thermique [36-38].

## I.4 Traitement d'estérification

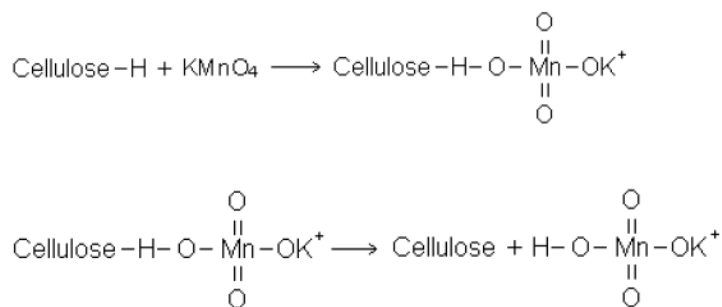
### I.4.1 Réaction d'acétylation

L'acide acrylique ( $\text{CH}_2=\text{CHCOOH}$ ) est également utilisé dans la polymérisation par greffage pour modifier la surface des fibres [39]. Cette réaction est initiée par les radicaux libres dans les molécules de cellulose. La cellulose est traitée avec une solution aqueuse contenant des ions sélectionnés et exposée à un rayonnement à haute énergie. Les molécules de cellulose sont ensuite cassées pour former des radicaux [40].



## I.5 Traitement au permanganate

Le permanganate est un composé qui contient le groupe de permanganate,  $\text{MnO}_4$ . Le traitement au permanganate entraîne la formation d'un radical cellulosique par la formation d'ions  $\text{MnO}_3$ . Ensuite, les ions  $\text{Mn}^{2+}$  hautement réactifs sont responsables de l'amorce de la copolymérisation du greffon, comme indiqué ci-dessous [43] :



La plupart des traitements au permanganate sont effectués à l'aide de permanganate de potassium ( $\text{KMnO}_4$ ) (en acétone) à différentes concentrations avec une durée de trempage de 1 à 3 min après le prétraitement alcalin [42-44].

## I.6 Autres traitements chimiques

Le chlorure de sodium ( $\text{NaClO}_2$ ) est couramment utilisé dans le blanchiment des fibres. Cependant, il est possible de classer la lignocellulose. Des études ont été menées là où il a été utilisé dans le traitement de surface des fibres pour les composites. [45] ont élargé la

fibre de sisal non traitée, pour utilisation dans les biocomposites de sisal-polystyrène, dans un liquide de chlorite de sodium avec un rapport de liqueur de 25 :1 à 75 °C pendant 2 h. Il a été signalé que la résistance à la flexion a été augmentée pour les fibres composites blanchies en raison de la rigidité inférieure et du caractère plus flexible des fibres après la délignification. Après la délignification, le polymère remplace le rôle de la lignine dans les fibres et rend les composites plus hydrophobes et plus résistants.

D'autres agents de couplage comme le peroxyde de benzoyle [41-45], l'anhydride acétique [47-49], l'anhydride d'acide maléique [50-52], les isocyanates [53-54] et l'acide stéarique [44-55] ont également été étudiés et utilisés pour modifier la surface entre la fibre et la matrice. La plupart des chercheurs ont trouvé que ces traitements sont efficaces et ont montré qu'il y a une meilleure liaison interraciales.

## I.7 Compositions chimiques et propriétés physiques des fibres naturelles

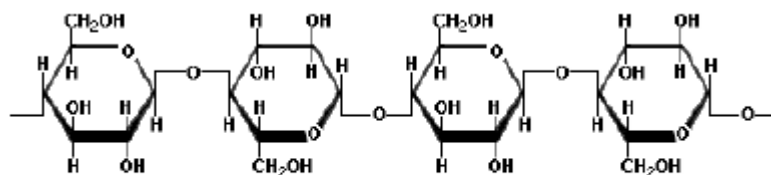
La composition de toute fibre naturelle varie selon l'origine, la région de production, la variété et la maturité de la plante. La cellulose, l'hémicellulose, la lignine et la pectine sont les principaux composants d'une paroi cellulaire naturelle pleinement développée. Ces polymères contenant des hydroxyles sont répartis dans toute la paroi de la fibre [56].

### I.7.1 Cellulose

La cellulose est un polymère de  $\beta$ -D-glucose orienté dans lequel le groupe  $-\text{CH}_2\text{OH}$  alterne au-dessus et au-dessous du plan de la molécule de cellulose, produisant ainsi de longues chaînes non ramifiées (figure 1.3). L'absence de chaînes latérales permet aux molécules de cellulose de se rapprocher et de former des structures rigides. La cellulose est le principal matériau de structure des plantes. Les longues micro-fibrilles cristallines fines dans la paroi cellulaire secondaire sont faites de cellulose. Il est le matériau de renforcement et est responsable de la haute résistance mécanique des fibres. Il se compose d'un polymère linéaire d'unités D-anhydroglucose où deux unités de glucose adjacentes sont reliées entre elles par des liaisons  $\beta$ -1, 4-glycosidiques avec l'élimination d'une molécule d'eau entre leurs groupes  $-\text{OH}$  aux atomes de carbone (C) 1 et 4. Chimiquement, La cellulose est définie comme un segment hautement cristallin qui alterne avec des régions de cellulose non cristalline ou amorphe [57-58].

Les monomères  $\beta$ -D-Glucose ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ ) en cellulose forment des liaisons hydrogène à la fois dans sa propre chaîne (intramoléculaire) formant des fibrilles et avec des chaînes voisines (intermoléculaires), formant des micro-fibrilles. Ces liaisons hydrogène conduisent à

la formation d'une structure cristalline linéaire avec une rigidité et une résistance élevées. Les régions de cellulose amorphes ont une fréquence plus faible de liaison hydrogène intermoléculaire, exposant ainsi les groupes intermédiaires OH réactifs à lier avec des molécules d'eau. La cellulose amorphe peut donc être considérée comme hydrophile en raison de sa tendance à se lier à l'eau.



Cellulose

Figure I.3 structure de cellulose.

### I.7.2 Hémicellulose

Ils comprennent un groupe de polysaccharides composés d'une combinaison de 5 et 6 sucres cycliques de carbone. Les hémicelluloses représentent près du tiers des glucides présents dans les tissus végétaux ligneux. La structure chimique des hémicelluloses est constituée de longues chaînes d'une variété de pentoses, d'hexoses et de leurs acides uroniques correspondants (figure 1.4). On peut trouver des hémicelluloses dans les fruits, les tiges des plantes et les coques de grains. Bien que les hémicelluloses ne soient pas digestibles, elles peuvent être fermentées par des levures et des bactéries. Les polysaccharides produisant des pentoses sur hydrolyse sont appelés pentosanes. Le xylan est un exemple de pentosane composé d'unités D-xylose avec des liaisons  $1\beta \rightarrow 4$ . L'hémicellulose est très hydrophile, soluble dans les alcalis et facilement hydrolysée dans les acides.

Les hémicelluloses diffèrent de la cellulose de trois façons différentes. Premièrement, contrairement à la cellulose (qui ne contient que 1,4- $\beta$ -D-glucopyranose), elle contient plusieurs unités de sucre différentes. Deuxièmement, ils présentent un degré considérable de ramification en chaîne, tandis que la cellulose est un polymère linéaire. Troisièmement, le degré de polymérisation de la cellulose indigène est de dix à cent fois supérieur à celui des

Hémicelluloses.

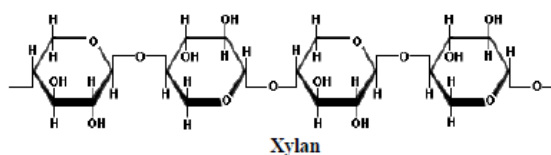


Figure I.4 structure d'Hémicellulose.

### I.7.3 Lignine

La lignine est un polymère complexe d'hydrocarbures contenant des constituants aliphatiques et aromatiques. Ils sont totalement insolubles dans la plupart des solvants et ne peuvent être décomposés en unités monomériques. La lignine est totalement amorphe et hydrophobe dans la nature. C'est le composé qui donne la rigidité aux plantes.

La lignine colle les fibres de cellulose ensemble pour former une structure rigide, ce qui permet aux arbres de 100 mètres de rester debout. La lignine est essentiellement un polymère désordonné, polyaromatique et réticulé issu de la polymérisation des radicaux libres de trois monomères (monolignols) liés structurellement au phényl-propane [62]. Ces trois monomères produisent presque toute la lignine présente dans la nature (figure 1.5 (a), (b)). L'alcool p-Coumaryl est un composant mineur des lignines de type herbe et fourrage.

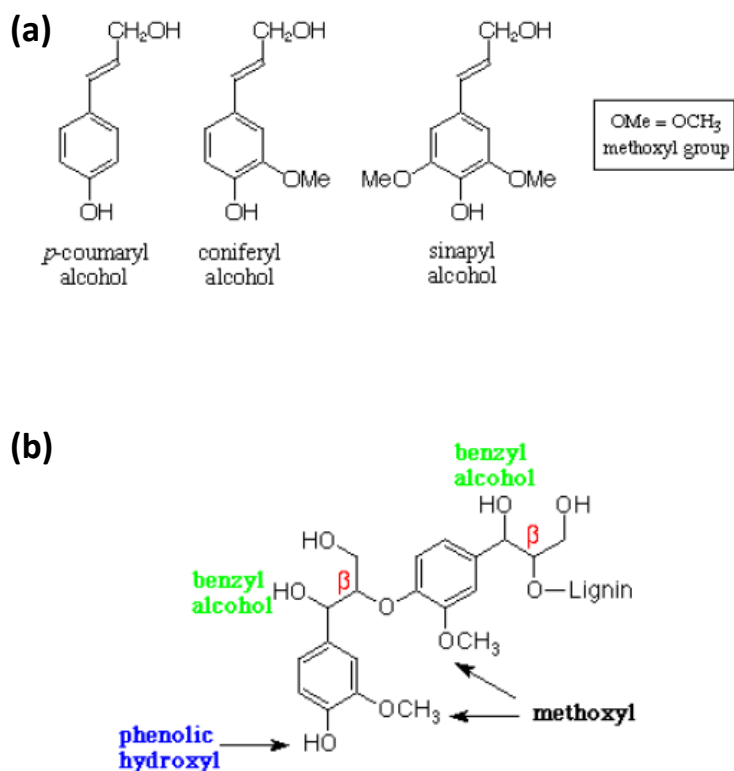


Figure I.5 (a) structure Lignine monomère (b) Structure typique de la lignine.

### I.7.4 pectine

La pectine est une structure ramifiée complexe de polysaccharides structuraux acides, que l'on trouve dans les fruits et les fibres libériennes. La majeure partie de la structure est constituée de résidus homopolymériques de poly- $\alpha$ -(1-4)-D-acide galacturonique

partiellement méthylé, mais il y a d'importantes zones non pileuses d'alternance de sections  $\alpha$ -(1-2)-L-rhamnosyl- $\alpha$ -(1-4)-D-galacturonosyl contenant des branches points avec des chaînes latérales majoritairement neutres (1-20 résidus) principalement de L-arabinose et de D-galactose (rhamnogalacturonan-I). La pectine est le composé le plus hydrophile dans les fibres végétales en raison des groupes d'acide carboxylique et elle est facilement dégradée par les champignons [57].

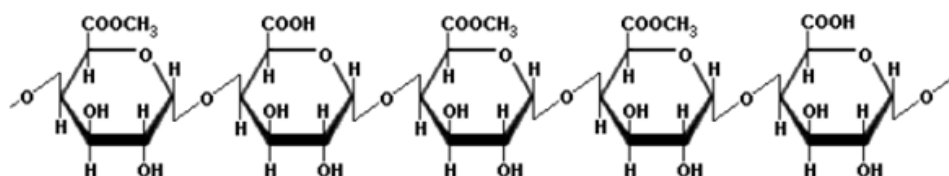


Figure I.6 Structure typique de la pectine.

### I.8 Modifications de la surface des fibres naturelles

Puisque la nature hydrophile des fibres naturelles provoque souvent de faibles propriétés interfaciales entre la fibre et la matrice plastique hydrophobe, des modifications chimiques sont considérées pour optimiser l'interface des fibres. Les produits chimiques peuvent activer les groupes hydroxyles ou introduire de nouveaux groupes qui peuvent s'emboîter efficacement avec la matrice. Le développement d'une théorie définitive du mécanisme de liaison par les produits chimiques dans les composites est un problème complexe. Généralement, les agents chimiques de couplage sont des molécules possédant deux fonctions. La première fonction est de réagir avec les groupes hydroxyles de cellulose et la seconde est de réagir avec les groupes fonctionnels de la matrice [40] ont décrit plusieurs mécanismes de couplage dans les matériaux, à savoir :

- a) élimination des couches limites faibles ;
- b) production d'une couche dure et flexible ;
- c) développement d'une région d'interphase fortement réticulée avec un module intermédiaire entre celui du substrat et celui du polymère ;
- d) amélioration du mouillage entre le polymère et le substrat ;
- e) formation de liaisons covalentes avec les deux matériaux ;
- f) altération de l'acidité de la surface du substrat.

### I.9 Composites / Biocomposites

Les composites sont parmi les matériaux d'ingénierie les plus avancés et les plus adaptables connus par l'homme. Les progrès de la science et de la technologie des matériaux

ont produit ces matériaux fascinants et merveilleux. Les composites sont de nature hétérogène et sont formés en liant deux composants ou plus avec des fibres de remplissage ou de renforcement et une matrice compressible [64]. La matrice peut être d'origine métallique, céramique ou polymérique. Le renforcement des fibres supporte la plupart des charges structurelles et fournit une rigidité et une résistance macroscopiques, tout en donnant au composite sa forme, son aspect de surface, sa compatibilité environnementale et sa durabilité globale [65]. Les composites peuvent offrir des propriétés mécaniques et physiques uniques car ils combinent les propriétés les plus souhaitables d'un composant tout en supprimant les propriétés indésirables. Les composites jouent désormais un rôle important dans l'aérospatiale, l'automobile et d'autres applications d'ingénierie. En raison de son excellent rapport résistance/poids et module/poids. Les composites rigides et performants de fibre de verre, de graphite, de Kevlar, de bore ou de carbure de silicium dans une matrice polymère ont été largement étudiés pour les applications aérospatiales. Les composites peuvent être classés sur la base de leurs composants structurels [66] :

1. Échelle : nano-composites ;
2. Géométrie du renforcement : Renforcé par des fibres, renforcé par des particules, et moulé en feuille ;
3. Matériau de la matrice : Composites à matrice polymère (CMP), composites à matrice céramique (CMC) et composites à matrice métallique (CMM) ;
4. Biocomposites.

Cette partie du chapitre se focalise sur l'effet des fibres naturelles traitées par divers procédés de fabrication afin de produire des composites dans diverses matrices polymériques courantes. Les fibres naturelles ont suscité une attention considérable dans les applications composites en raison d'avantages tels que des propriétés mécaniques raisonnables, une faible densité, la possibilité de renouvellement, des ressources provenant de sources renouvelables, l'abondance et la faisabilité économique [67]. Les performances des composites à base de fibres naturelles dépendent de nombreux facteurs tels que la composition, la structure, la longueur, le traitement des fibres et l'interface fibre/matrice [68].

### 1.9.1 Composites à matrice polymère (CMP)

Beaucoup de matériaux lorsqu'ils sont sous forme fibreuse présentent une très bonne propriété de résistance, mais pour atteindre ces propriétés, les fibres doivent être collées par une matrice appropriée. La matrice répartit les charges uniformément entre les fibres de sorte que toutes les fibres sont soumises à la même quantité de contrainte. Il aide à éviter la

propagation de la croissance de fissure à travers les fibres en fournissant le chemin de défaillance alternatif le long de l'interface entre les fibres et la matrice. Il a également de bonnes caractéristiques d'écoulement de sorte qu'il pénètre complètement les faisceaux de fibres et élimine les vides pendant le processus de compactage/durcissement. Une bonne matrice améliore la résistance aux chocs et aux fractures d'un composite et porte également un cisaillement interlaminaire.

Les composites à matrice d polymère (CMP) sont composés d'une variété de fibres courtes ou continues liées ensemble par une matrice de polymère organique. Les composites à matrice polymère sont beaucoup plus faciles à fabriquer que CMM et CMC. Cela est dû à la température de traitement relativement basse requise pour la fabrication d'un composite à matrice polymère. Le renfort en CMP offre une grande résistance et rigidité. Le CMP est conçu de manière à ce que les charges mécaniques auxquelles la structure est soumise en service soient supportées par l'armature. En règle générale, les fibres constituent environ 60 % d'un composite à matrice polymère par volume. Un très grand nombre de matériaux polymères, les deux thermodurcissable et thermoplastique, sont utilisés comme matériaux matriciels pour les composites.

Tableau I.5 Avantages et limites des matériaux à matrice polymère.

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible densité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Faible résistance transversale</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonne résistance à la corrosion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Limites de température de fonctionnement basses</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faibles conductivités thermiques</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faibles conductivités électriques</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Translucidité</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effets de couleur esthétiques</li> </ul>	

### I.9.2 Avantages de l'utilisation de composites à base de fibres naturelles

Les fibres naturelles sont utilisées comme renfort dans les composites polymères et dépendent de certains facteurs tels que la structure des fibres végétales, la stabilité thermique, la longueur, la contrainte et l'orientation, la présence de vides et l'absorption d'humidité des fibres [69]. La stabilité thermique est toujours affectée par l'humidité, les additifs et d'autres facteurs [70]. En changeant la matrice des composites, les valeurs de résistance à la traction et de module élastique peuvent être considérablement modifiées. D'autre part, si ces fibres sont réglées pour la charge souhaitée, la résistance augmentera également. Cependant, étant donné que les fibres naturelles peuvent avoir des propriétés mécaniques différentes en

fonction de la liaison interfaciale entre les polymères, le module élastique des biocomposites en fibres de Jowar est 11 % supérieur à celui des biocomposites en fibres de bambou, par rapport à celui des biocomposites en fibres de sisal.

**Tableau I.6** Quelques travaux des biocomposites en polymères thermoplastiques et thermodurcissables renforcés par différentes fibres naturelles [69-77].

Thermoplastique	Caractéristiques	Fibres végétales
<b>Polypropylène (PP)</b>	Matériau léger, bonnes propriétés d'isolation, non toxique, faible absorption d'humidité et faible coût.	Curaua [78], flax [79], hemp [80], jute [73], palm, sisal [81], wheat straw [81], banana [74].
<b>Polyéthylène (PE)</b>	Non-toxique, faible absorption d'humidité, faible coût, rigide et résistant à l'humidité.	Banana [82], green coconut husks [83], rice husk [84], sisal.
<b>Nylon</b>	Grande stabilité et adaptabilité	Kenaf, flax, hemp [85]
<b>Cellulose acetate</b>	Faible toxicité, bonne stabilité, perméabilité élevée, température de transition vitreuse (Tg) élevée, production de films résistants, biocompatibilité avec une série d'agents additifs et capacité à former des micro et nanoparticules.	Kenaf [86-87], curauá [88], sisal [89]
<b>Polystyrène (PS)</b>	Résistance élevée aux alcalis et aux acides, faible densité et faible absorption d'humidité, faible résistance aux solvants organiques et à la chaleur.	Agave [90], banana [91], hemp [91], sisal [91].
<b>Polyvinyl chloride (PVC)</b>	Résistant, imperméable, durable, inoffensif, non toxique.	Areca [92], bamboo [93], straw [94], rice [95].
<b>High-density polyéthylène (HDPE)</b>	Bonne résistance aux chocs à basse température et excellente résistance chimique.	Banana [96], curaua [97], sisal [98].
<b>High impact polystyrène (HIPS)</b>	Flexibilité, résistance aux chocs, facilité d'usinage et faible coût.	Green coconut husks [99], sisal [100], sugar cane bagasse [102].
<b>Polyester</b>	Solide, flexible, sèche rapidement, résiste aux plis et au rétrécissement.	Bamboo [103], banana [105], coconut [105], curaua [106], flax [107], hemp [108], jute [109], pineapple [110], sisal [111-112].
<b>Polyurethane (PU)</b>	Résistance élevée à l'abrasion, bonne aptitude à la basse température, grande variabilité de la structure moléculaire, possibilité de durcissement à température ambiante et faible coût.	Banana [113], coir [114], sisal [115].
<b>Epoxy</b>	Pratiquement aucun rétrécissement après le moulage, résistance aux chocs et aux températures élevées, résistance aux produits chimiques et aux champignons.	Banana [116-117], coir [118], cotton [119], flax [120-121], hemp [121], Jute [122-123], pineapple [124], sisal [125-126].

### I.10 Techniques de fabrication de biocomposites

L'étude documentaire est réalisée dans le cadre du travail de thèse pour avoir une vue d'ensemble des processus de production, des propriétés et du comportement tribologique du composite polymère. Les structures composites ont affiché des économies universelles d'au

moins 20 % par rapport aux contreparties métalliques et des coûts d'exploitation et d'entretien inférieurs [127]. Au fur et à mesure que les données sur la durée de vie des structures composites deviennent disponibles, il est possible de dire sans risque qu'elles sont durables, maintiennent l'intégrité dimensionnelle, résistent aux charges de fatigue et sont facilement maintenables et réparables. Les composites continueront à trouver de nouvelles applications, mais la croissance à grande échelle du marché de ces matériaux nécessitera des méthodes de traitement moins coûteuses et la perspective de recyclage [128] devra être résolue [129].

En général, une phase discontinue (renforcement) est intégrée dans une phase continue (matrice). Les matériaux composites à base de polymères (MCP) ou PRF constituent une grande catégorie de matériaux composites ayant une vaste gamme d'applications. Ils offrent des propriétés très attrayantes, qui peuvent être adaptés aux exigences spécifiques par une sélection minutieuse de la fibre, la matrice, la configuration des fibres (courtes, longues, résistantes, tissées, tressées, stratifiées, etc.) et le traitement de surface des fibres. Les MCP présentent des propriétés physiques et chimiques souhaitables, notamment un poids léger associé à une rigidité et une résistance élevées le long de la direction de la fibre de renfort, la stabilité dimensionnelle, la température et la résistance chimique et un traitement relativement facile.

Le rôle de la matrice dans un composite renforcé de fibres est de :

- a) Contraintes de transfert entre les fibres.
- b) Constituer une barrière contre un environnement défavorable.
- c) Protéger la surface des fibres contre l'abrasion mécanique.

Il existe deux divisions générales des procédés de fabrication de composites : le moulage ouvert et le moulage fermé. Avec le moulage ouvert, la couche de gel et le stratifié sont exposés à l'atmosphère pendant le processus de fabrication. Dans le moulage fermé, le composite est traité dans un ensemble de moules en deux parties, ou dans un sac sous vide. Il existe une variété de méthodes de traitement dans les catégories de moulage ouvert et fermé :

- **Méthode de moulage ouverte :** Moulage à la main, au pistolet, enroulement du filament.
- **Méthode de moulage fermée :** Moulage par compression, Pultrusion, Moulage par sac sous vide, Traitement par infusion sous vide, Moulage par transfert de résine (MTR).

### I.10.1 Technique de moulage ouvert

Le processus de moulage ouvert sature le renfort de fibres avec de la résine, en utilisant des techniques de déploiement manuel pour consolider le stratifier et enlever l'air piégé. Un facteur majeur dans cette opération est le transfert de résine d'un tambour ou des réservoirs de stockage au moule. Les moyens utilisés pour transporter la résine, dans de nombreux cas, caractérisent le procédé spécifique.

#### I.10.1.1 Pose à la main

Moulage à la main est une méthode de moulage ouverte adaptée à la fabrication d'une grande variété de produits composites (bateaux, réservoirs de bain, logements, camions / composants automobiles, produits architecturaux) et de nombreux autres produits allant de très petite à très grande.

Le volume de production par moule est faible ; cependant, il est possible de produire des quantités substantielles en utilisant plusieurs moules. Des moules simples à cavité unique en fibre de verre sont généralement utilisés. Les moules peuvent varier de très petits à très grands et sont peu coûteux dans le spectre des moules composites souples.

La couche de gel est d'abord appliquée sur le moule à l'aide d'un pistolet pulvérisateur pour une surface de haute qualité. Lorsque la couche de gel est suffisamment durcie, le renfort en fibre de verre est placé manuellement sur le moule. La résine de stratification est appliquée par coulée, brossage, pulvérisation, ou à l'aide d'un rouleau de peinture. Des rouleaux FRP, des rouleaux de peinture ou des raclettes sont utilisés pour consolider le stratifier, mouiller complètement le renfort et éliminer l'air emprisonné. Des couches de renfort en fibre de verre sont ajoutées pour construire l'épaisseur stratifiée (figure 1.7). La méthode la plus simple offrant un outillage à faible coût, un traitement simple et une large gamme de tailles de pièces sont les principaux avantages de ce procédé. Les changements de conception sont faciles à apporter.

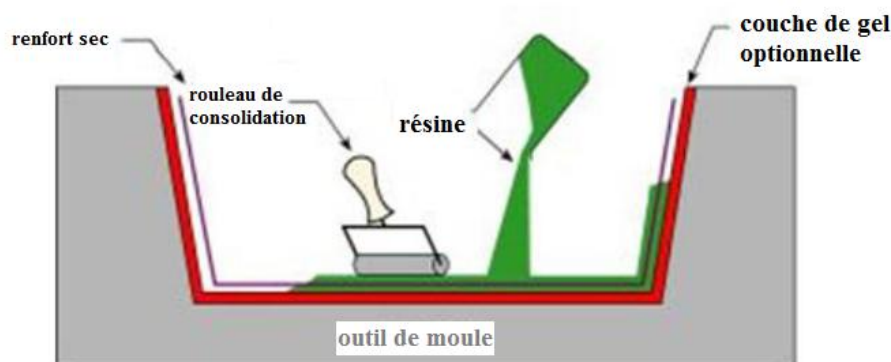


Figure I.7 Techniques de moulage à mains [203].

### I.10.1.2 Pose au pistolet

Le pistolet est semblable à la mise en place à la main dans son aptitude à fabriquer des bateaux, des réservoirs, des composants de transport et des unités de baignoire/douche dans une grande variété de formes et de tailles. Un stratifié haché a une bonne conformabilité et est parfois plus rapide que le moulage à la main dans une formes complexes. Dans le procédé de pose au pistolet, l'opérateur contrôle l'épaisseur et la consistance, de sorte que le procédé dépend davantage de l'opérateur que de la pose à la main. Bien que le volume de production par moule soit faible, il est possible de produire des quantités substantielles en utilisant plusieurs moules. Comme pour la pose à la main, la couche de gel est d'abord appliquée sur le moule avant de pulvériser le stratifié du substrat.

Le verre continu et la résine catalysée sont alimentés par un broyeur, qui dépose la « côtelette » saturée de résine sur le moule, comme le montre la figure I.8. Le stratifié est ensuite roulé pour saturer complètement les brins de verre et compacter la côtelette. Des couches supplémentaires de pelliculage de côtelettes sont ajoutées au besoin pour l'épaisseur

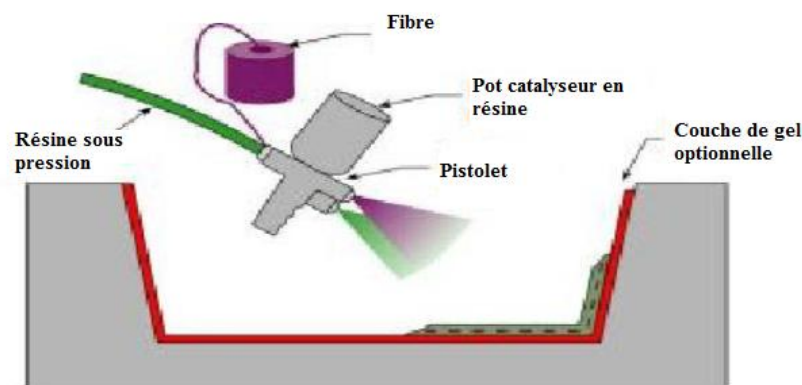


Figure I.8 Techniques de moulage ouvert pose au pistolet [203].

### I.10.1.3 Enroulement de filament

L'enroulement du filament est un processus de moulage automatique ouvert qui utilise un mandrin rotatif comme moule. La configuration du moule mâle produit une surface intérieure finie et une surface rugueuse laminée sur le diamètre extérieur du produit. L'enroulement des filaments entraîne un haut degré de charge de fibres, ce qui offre une résistance élevée à la traction dans la fabrication de produits creux, généralement cylindriques, tels que les réservoirs de stockage de produits chimiques et de carburant, les tuyaux, les cheminées, les récipients sous pression et les boîtiers de moteur de fusée. Les

mandrins de taille et de forme appropriées, en acier ou en aluminium, forment la surface intérieure de la partie creuse. Certains mandrins sont repliables pour faciliter l'enlèvement des pièces.

La [figure I.9](#) montre le schéma d'un processus typique d'enroulement du filament. Le brin continu en rotation est alimenté par un bain de résine et placé sur un mandrin rotatif. L'alimentation itinérante circule sur un chariot qui traverse la longueur du mandrin. Le filament est déposé dans un modèle géométrique prédéterminé pour fournir une résistance maximale dans les directions requises. Lorsque suffisamment de couches ont été appliquées, le stratifié est durci sur le mandrin. La partie moulée est ensuite dépouillée du mandrin. L'équipement est disponible pour l'enroulement de filaments sur une base continue avec deux axes d'enroulement pour les bouteilles sous pression. Ce procédé permet de réaliser des stratifiés à haut rapport résistance-poids et offre un haut degré de contrôle sur l'uniformité et l'orientation des fibres. Le processus d'enroulement du filament peut être utilisé pour fabriquer des structures hautement conçues qui respectent des tolérances strictes. Étant donné que l'enroulement du filament est automatisé, le facteur de main-d'œuvre pour l'enroulement du filament est inférieur aux autres processus de moulage ouverts.

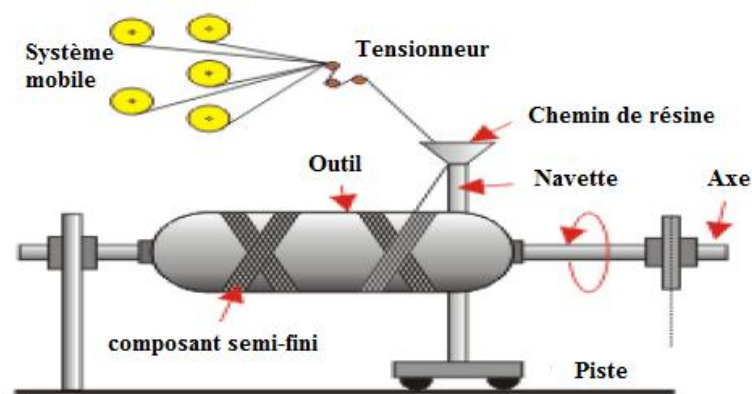


Figure I.9 Procédé d'enroulement de filament [203].

### I.10.2 Technique de moulage fermé

Il s'agit d'un processus où la quantité de matériau de moulage est mesurée et insérée avant le moulage a lieu. Le matériau de moulage est préchauffé et chargé dans une chambre connue sous le nom de pot. Ensuite, le matériau coule à travers le système de coureur dans les cavités de moule. Le moule reste fermé lorsque le matériau est inséré et ouvert pour libérer la pièce après le durcissement. Le moulage peut se faire à la fois par compression et par transfert. La technologie de moulage fermé est utilisée pour la fabrication de pièces composites en polymère en moins de temps, de haute précision dimensionnelle, de nature

répétitive à faible coût. Un large éventail d'industries utilise des technologies de moule fermé pour fabriquer des pièces de précision comme l'aérospatiale, le transport, et les industries de loisirs, etc.

#### I.10.2.1 Moulage par compression

Le moulage par compression est une méthode à haut volume et à haute pression adaptée au moulage de pièces en plastique complexes renforcées de fibre de verre sur une durée de cycle rapide. Il existe plusieurs types de moulage par compression, y compris : composé de moulage en feuille qui sont, composé de moulage en vrac, composé de moulage épais, et moulage par compression humide.

L'outillage de moulage par compression se compose de moules métalliques chauffés montés dans de grandes presses. L'outillage est généralement usiné en acier ou moulé des moules en alliage qui peuvent être dans une ou plusieurs cavités configurations. Les moules en acier sont durcis et parfois chromés pour une durabilité accrue. Les moules sont chauffés à la vapeur, à l'huile chaude ou à l'électricité. On utilise souvent des noyaux latéraux, des garnitures et d'autres améliorations. Les matériaux de moulage comprennent l'acier forgé, la fonte et l'aluminium moulé.

L'ensemble de moules est monté dans une presse à mouler hydraulique ou mécanique. Les moules sont chauffés à 2500 à 4000 F. Une charge de poids du composé de moulage est placée dans le moule ouvert comme indiqué sur la [figure I.10](#). Les deux moitiés du moule sont fermées et la pression est appliquée. Selon l'épaisseur, la taille et la forme de la pièce, les cycles de durcissement varient de moins d'une minute à environ cinq minutes. Le moule est ouvert et la partie finie est enlevée. Les pièces typiques comprennent les composants automobiles, les boîtiers et les composants structurels des appareils ménagers, les meubles, les composants électriques et pièces des machines d'affaires.

Le moulage par compression produit des cycles de moulage rapides et une grande uniformité des pièces. Le processus peut être automatisé. Une bonne flexibilité de conception des pièces et des caractéristiques telles que les inserts, les nervures, les bossages et les accessoires peuvent être moulés. De bonnes finitions de surface sont disponibles, ce qui contribue à réduire le coût de finition des pièces. Les opérations ultérieures de coupe et d'usinage sont minimisées dans le moulage par compression.

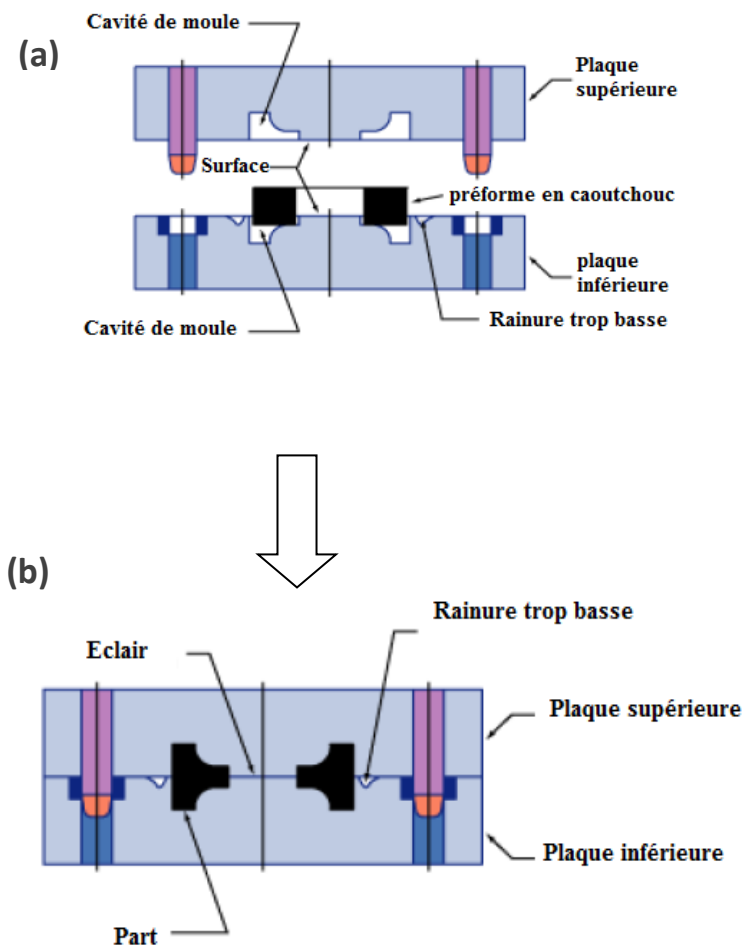


Figure I.10 Technique de moulage par compression (a) Compression moulage ouvert (b) Compression moulage fermé.

### I.10.2.2 Pultrusion

La pultrusion est un procédé continu pour la fabrication de produits ayant une section constante, tels que la tige, les formes structurelles, les canaux de poutres, les tuyaux, les tubes, les cannes à pêche et les arbres de club de golf. Pultrusion produit des profils avec une charge en fibres extrêmement élevée, donc les produits pultrusion ont des propriétés structurelles élevées. Les matrices en acier trempé sont usinées et comprennent une zone d'exécution pour effectuer le façonnage initial de l'anneau saturé de résine. Les matrices comprennent le chauffage qui peut être électrique ou de l'huile chaude. La technologie de pultrusion la plus récente utilise des matrices à injection directe, dans lesquelles la résine est introduite à l'intérieur de la matrice, plutôt que par un bain de résine externe, qui peut être appelé RTM partiel.

Un voile continu en fibre de verre, tapis, tissu ou voile de surfacage est imprégné dans un bain de résine, puis tiré (pultrusion) à travers une matrice en acier, par un puissant

mécanisme de tracteur (figure I.11). La matrice en acier consolide le renfort saturé, fixe la forme du stock et contrôle le rapport fibre/résine. La matrice est chauffée pour traiter rapidement la résine. De nombreux cris (boules) de roulement sont positionnés sur un rack, et une série complexe de dispositifs de tension et de guides de roulement dirigent le roulement dans la matrice. Le processus est une opération continue qui peut être facilement automatisée. Il est adaptable aux formes transversales simples et complexes. Des forces très élevées sont possibles en raison de la charge en fibre et les coûts de main-d'œuvre sont faibles.

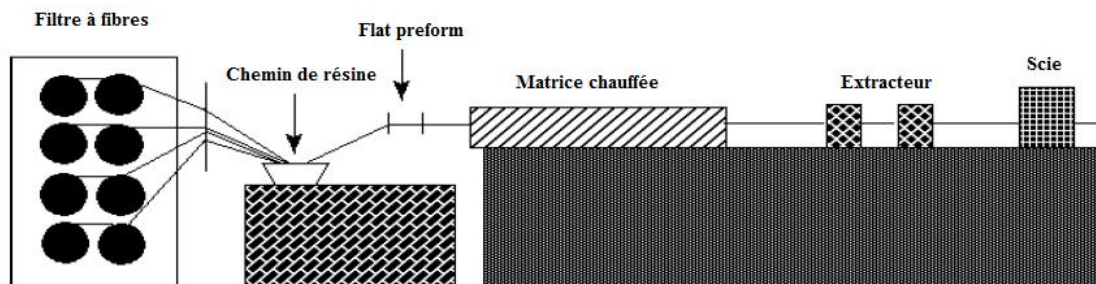


Figure I.11 Processus de pultrusion [203].

### I.10.2.3 Moulage du sac sous vide

Les propriétés mécaniques des stratifiés à moule ouvert peuvent être améliorées avec l'ensachage sous vide. En réduisant la pression à l'intérieur du sac à vide, la pression atmosphérique externe exerce une pression sur le sac. La pression sur le stratifié élimine l'air piégé, l'excès de résine et compacte le stratifié. L'ensachage sous vide peut être utilisé avec des stratifiés mouillés et des composites avancés pré-imprégnés. En cas de mise en sac humide, le renfort est saturé à la main, puis le sac à vide est monté sur le moule et utilisé pour compacter le stratifier et éliminer les vides d'air. Dans le cas de pré-imprégnation avancée de moulage composites, le matériau préparé est mis en place sur le moule, le sac à vide est monté et le moule est chauffé ou le moule est placé dans un autoclave qui applique la chaleur et la pression externe, ajoutant à la force de la pression atmosphérique. La méthode sac-autoclave sous vide préparé est le plus souvent utilisée pour créer des composites avancés utilisés dans les avions et les produits militaires. Les moules sont similaires à ceux utilisés pour les procédés conventionnels de moule ouvert.

Dans la forme la plus simple de l'ensachage sous vide, un film flexible (PVA, nylon, mylar, ou polyéthylène) est placé sur la couche humide, les bords scellés, et un aspiré sous vide. Une forme plus avancée d'ensachage sous vide place un film de libération sur le stratifié, suivi d'un pli de fuite de tissu de fibre de verre, de nylon non tissé, de tissu de

polyester, ou d'un autre matériau qui absorbe l'excès de résine du stratifié. La [figure I.12](#) montre le schéma du processus de moulage du sac sous vide. Une couche respirant d'un tissu non tissé est placée sur la couche de résistance de fuite, et le sac à vide est monté sur l'ensemble. Tirer un aspirateur de l'intérieur du sac utilise la pression atmosphérique pour éliminer les vides et forcer l'excès de résine du stratifié. L'ajout de pression entraîne en outre une forte concentration de fibres et offre une meilleure adhérence entre les couches de construction sandwich. Lors de la pose de feuilles non tournées de mousse de PVC ou de balsa dans un moule femelle, l'ensachage sous vide est la technique de choix pour assurer une liaison secondaire appropriée du noyau au stratifié extérieur.

Le traitement des sacs sous vide peut produire des stratifiés avec un degré uniforme de consolidation, tout en éliminant l'air emprisonné, réduisant ainsi le contenu du vide fini. Les structures fabriquées avec des techniques traditionnelles de pose à la main peuvent devenir riches en résine et l'ensachage sous vide peut éliminer le problème. En outre, la fibre complète peut être réalisée si le processus est fait correctement. L'amélioration du collage du noyau est également possible avec le traitement du sac sous vide.

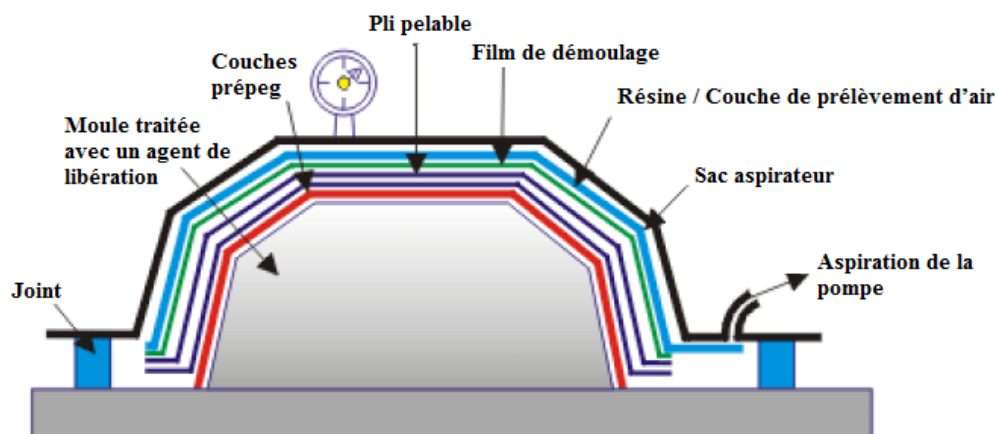


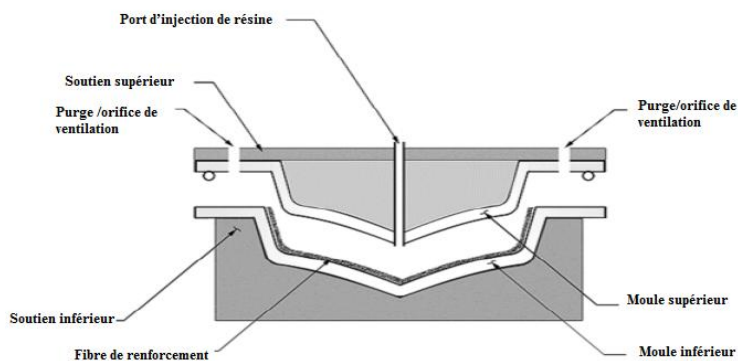
Figure I.12 Moulage des sacs à vide.

#### I.10.2.4 Moulage par transfert de résine (MTR)

Le moulage par transfert de résine est un processus de moulage de volume intermédiaire pour la production de composites. Le procédé MTR consiste à injecter de la résine sous pression dans une cavité de moule. L'aide au vide peut être utilisée pour améliorer le débit de résine dans la cavité de moule. MTR peut utiliser une grande variété d'outils, allant des moules composites à faible coût à l'outillage métallique à température contrôlée. Le MTR peut utiliser des outils « durs » ou « mous », selon la durée prévue de l'analyse. Les outils

souples seraient des moules en polyester ou en époxy, tandis que les outils durs pourraient consister en aluminium moulé usiné, en coque de nickel électroformée ou en moules en acier usinés. MTR peut profiter de la plus large gamme d'outillage.

La [figure I.13](#) montre le procédé de moulage par transfert de résine de polyester avec catalyseur de peroxyde. L'ensemble de moules est recouvert de gel conventionnellement, si nécessaire. Le renfort (et le matériau de base) est placé dans le moule et le moule est fermé et serré. La résine est injectée sous pression, à l'aide d'un équipement d'injection de mélange/mètre, et la pièce est durcie dans le moule. Le renfort peut être soit des performances ou du matériel de bobine de coupe de modèle. Effectue son renforcement qui est préformé dans un processus séparé et peut être rapidement positionné dans le moule. Le MTR peut être réalisé à température ambiante ; cependant, des moules chauffés sont nécessaires pour obtenir des temps de cycle rapides et une uniformité du produit. En plaçant le matériau de renfort à sec à l'intérieur du moule, toute combinaison de matériaux et d'orientation peut être utilisée, y compris les renforts 3D. L'épaisseur de la pièce est déterminée par la cavité de l'outil.



[Figure I.13](#) Moulage par transfert de résine [203].

#### I.10.2.5 Traitement de perfusion sous vide

L'infusion sous vide est une variante de l'ensachage sous vide où la résine est introduite dans le moule après que le vide a tiré le sac vers le bas et compacté le stratifié. La méthode est définie comme ayant une pression inférieure à la pression atmosphérique dans la cavité de moule. L'armature et le matériau de noyau sont mis en place sec dans le moule. Cela se fait à la main et permet de positionner précisément le renfort. Lorsque la résine est tirée dans le moule, le stratifié est déjà compacté ; par conséquent, il n'y a pas de place pour l'excès de résine. Un rapport résine-verre très élevé est possible avec l'infusion sous vide et les propriétés mécaniques du stratifié sont supérieures. L'infusion sous vide convient pour mouler de très grandes structures et est considérée comme un processus de moulage à faible volume. Les moules sont similaires à ceux utilisés pour les procédés conventionnels de moule

ouvert. Le moule peut être recouvert de gel selon la tradition. Une fois la couche de gel durcie, le renfort sec est placé dans le moule. Cela comprend toutes les couches du stratifié et du matériau de base si nécessaire. Un film de libération perforé est placé sur le renfort sec. Ensuite, on positionne un fluide d'écoulement constitué d'un maillage ou d'un pli « plissé », et la tubulure perforée est positionnée comme un collecteur pour distribuer la résine à travers le stratifié. Le sac à vide est ensuite positionné et scellé au périmètre du moule. Un tube est connecté entre le vide, le sac et le conteneur en résine. Un vide est appliqué pour consolider le stratifié et la résine est aspirée dans le moule (figure I.14). L'infusion sous vide peut produire des stratifiés avec un degré uniforme de consolidation, produisant des structures légères et de haute résistance. Ce procédé utilise le même outillage à faible coût que le moulage ouvert et nécessite un équipement minimal. De très grandes structures peuvent être fabriquées en utilisant cette méthode. L'infusion sous vide offre une réduction substantielle des émissions par rapport au moulage ouvert ou à l'ensachage sous vide par voie humide.

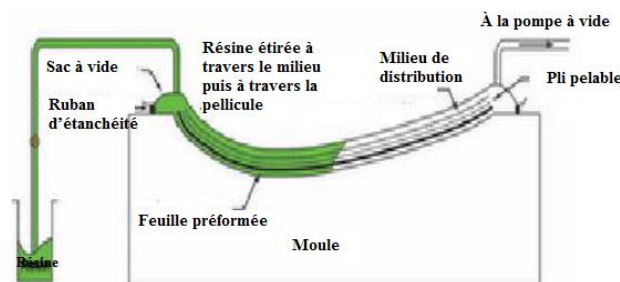


Figure I.14 Processus d'infusion sous vide.

#### I.10.2.6 Le moulage par injection

Le moulage par injection est une méthode importante de traitement des matières plastiques, qui se caractérise par des taux de production rapides et des volumes de production élevés. Injection moulage peut fabriquer des composants géométriques complexes avec des dimensions précises et le processus est automatisé. Mais il ya une limitation sur la fraction de fibre et la longueur de fibre lorsqu'utiliser le moulage par injection pour traiter les biocomposites renforcées de fibres [130] parce qu'une plus grande fraction de fibres naturelles et une plus longue longueur de fibres rendront le moulage difficile. Pendant le moulage par injection, les étapes suivantes ont lieu :

- a) le matériau est introduit par une trémie dans la zone de la vis et fondu ;
- b) le matériau est ensuite forcé sous pression dans le moule par un mouvement axial de la vis ;
- c) une fois le matériau dans le moule, il est façonné et refroidi ;

- d) le moule est ouvert et le produit est éjecté,
- e) le moule est fermé et il est prêt à commencer le cycle suivant.



Figure I.15 Machine de moulage par injection (Battenfeld Maschinen, Allemagne) au Northern Alberta Institute Technology (NAIT).

Les principaux composants de la machine de moulage par injection sont l'unité de plastification (unités d'injection et hydrauliques), l'unité de serrage et le moule [131]. La section transversale de l'unité d'injection et le moule d'une seule machine de moulage par injection à vis sont donnés à titre d'exemple dans la figure I.16.

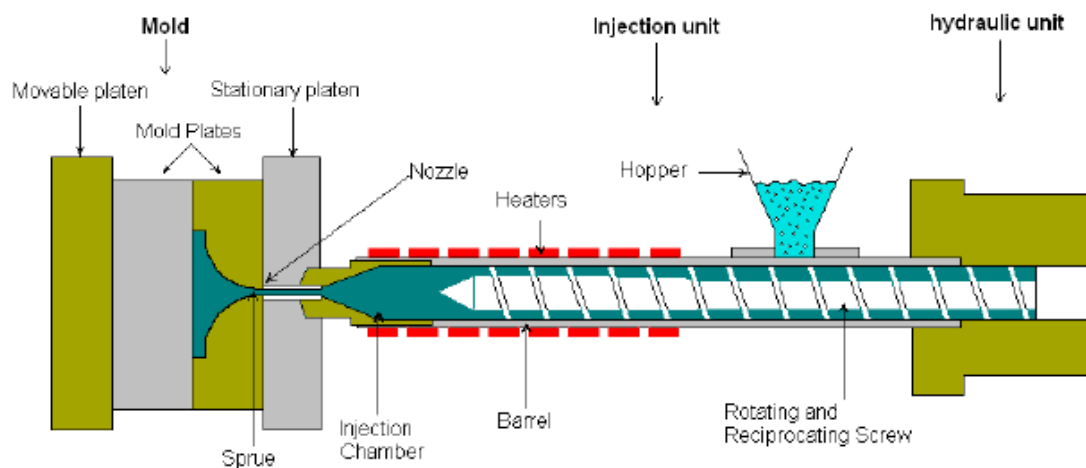


Figure I.16 Une seule machine de moulage par injection à vis (The Santa Clara University Design Center 1998).

L'unité d'injection fond le polymère et l'injecte dans le moule. Le système hydraulique contrôle la réciprocité axiale de la vis, lui permettant d'agir comme un piston. Le

moule se compose essentiellement d'une épipette, d'un chemin, d'une porte à cavité et d'une cavité [131].

#### I.10.2.7 Extrusion

Le procédé d'extrusion consiste essentiellement à façonner en continu un polymère par l'orifice d'un moule approprié (matrice), puis à le solidifier en un produit [132]. Il existe des extrudeuses mono-vis et bi-vis. Par rapport aux extrudeuses mono-vis, les extrudeuses bi-vis co-rotatives produisent plus de cisaillement et améliorent les capacités de mélange [133]. L'extrusion est le procédé le plus efficace et largement utilisé pour fondre la résine plastique et mélanger les renforts dans le plastique fondu, ce qui entraîne des volumes de production élevés. La température dans l'extrudeuse doit être suffisamment élevée pour que le polymère soit complètement fondu et suffisamment basse pour éviter de brûler la fibre. Par exemple, [134] ont extrudé un composite fibre de bois-PEHD à une température de fonctionnement de 150 °C et une vitesse de vis de 100 tr/min, tandis que le point de fusion du polymère se situe entre 120 et 135 °C. L'extrusion est nécessaire pour les produits composites moulés par injection avant le moulage par injection. Le rapport inférieur longueur-diamètre de la vis dans la machine d'injection la rend moins efficace dans le mélange et la fusion non homogène par rapport aux extrudeuses. Pour cette raison, si le composite est traité par moulage par injection, un mélange d'extrusion préalable est nécessaire pour les matériaux.

#### I.11 Usinage des biocomposites

Au cours des dernières décennies, la demande de stratifiés composites renforcés de fibres comme les plastiques renforcés de fibres de carbone (PRFC), les plastiques renforcés de fibres de verre (PRFV) et les stratifiés de fibres métalliques (FML) a fortement augmenté [135-136]. Le polymère renforcé de fibres (PRF) est formé par une combinaison de matrice et de fibres renforcées, dans lesquelles une fibre forte mais fragile fournit une résistance élevée tandis que la phase matricielle réduit la concentration de contrainte, absorbe l'énergie et fournit ainsi une résistance élevée à la rupture [137]. Par conséquent, les stratifiés composites peuvent offrir des propriétés mécaniques supérieures en termes de rapport résistance-poids, de rigidité-poids, de ténacité et de résistance à la corrosion. En raison de ces avantages, les stratifiés composites ont des applications étendues dans divers secteurs de fabrication tels que l'aéronautique, l'aérospatiale, la marine, l'automobile, les services médicaux, les équipements de traitement chimique et les articles de sport. En tant que processus de fabrication final important pour les stratifiés composites, le processus de perçage est largement utilisé pour

produire des joints rivetés et boulonnés pour la fixation de la structure composite avec d'autres composants. On a signalé que 40 % de l'enlèvement des matériaux se faisait par forage dans l'industrie aérospatiale [139]. Bien que certains procédés spéciaux non conventionnels de forage, tels que le jet d'eau, le laser et l'électro-érosion, aient été dûment industrialisés pour les stratifiés composites, le forage mécanique classique avec utilisation d'outils de forage reste la technique principale pour faire des trous sur des stratifiés composites [140].

### I.11.1 Techniques de perçage

Malgré le développement de diverses techniques de forage non conventionnelles, par exemple, l'usinage au laser [141-142], l'usinage au jet d'eau [143-145], électrochimique, à décharge électrochimique et à décharge électrochimique pour faire les trous des composites, les méthodes classiques de forage mécanique sont encore utilisées comme principales applications pour les CRNC (tableau 1). Ces méthodes sont principalement des machines de perçage radial, des centres d'usinage verticaux, des centres d'usinage verticaux CNC et des fraiseuses.

Tableau I.7 Divers procédés de forage qui ont été signalés dans la documentation sur les CRNC.

Procédé de perçage	Remarques	Références
<b>Conventionnel</b>		
Perceuse radiale	Le procédé est paramétré en fonction de la vitesse (500, 860, 1360 tr/min), de l'avance (18, 26, 34 mm/min), de l'outil (foret en carbure solide, foret Jo, foret parabolique).	[146-147-148-149-150]
Fraiseuse, centre de fraisage vertical SPINNER VC650	Outils de perçage : 8-facettes, Dagger, Slot, HSS (angle de pointe 118°), HSS (angle de pointe 80° et angle d'hélice 40°), Vitesse : 710-200 tr/min.	[151-152-153]
Centre d'usinage vertical	Vitesse (max)- 6000 tr/min, Course de l'outil- 510 mm × 410 mm × 46 mm, Angles de pointe HSS : 60°, 90° et 120°.	[154-155-156-157-158-159-160-161-162-163-164-165-166-167]
Centre d'usinage vertical CNC	Plage de vitesse de coupe : 60-13000 tr/min, Avance : jusqu'à 4000 mm/min, Outils de perçage : HSS, foret hélicoïdal, foret étagé, CoroDrill 854, CoroDrill 856	
<b>Non conventionnel</b>		
Perçage par faisceau laser	Longueur d'onde du laser : 1064 nm, divergence du faisceau (angle complet) : 6 mrad, diamètre du faisceau:10 mm, puissance moyenne de la pompe : 5 kW, puissance de crête (max) : 5 kW, puissance de sortie moyenne (max) : 250 W, énergie d'impulsion (max) : 100 J, fréquence de répétition des impulsions : 1-200 Hz, largeur d'impulsion : 1-20 ms, fibre de délivrance du faisceau (diamètre du cœur) : 600 µm, efficacité de transmission (à travers la fibre) : 90 %, taille du spot focalisé sur le travail : 600 µm.	[168-169]
Perçage par jet d'eau abrasif	Abrasif : eau et particules de grenat et Diamètre de la buse : 0,76 mm	[170-171-172]

#### I.11.1.1 Perçage mécanique conventionnel

Le perçage conventionnel est rentable pour la fabrication du trou dans les NFRC. C'est le premier choix des chercheurs qui utilisent un foret hélicoïdal et plusieurs outils de perçage spéciaux. Par conséquent, il doit être étudié en profondeur. De ce fait, les objectifs principaux du perçage conventionnel des NFRC peuvent être divisés en quatre classes comme suit :

1. Expérimentations inclusives : Il existe de nombreux travaux de recherche sur l'influence des paramètres d'entrée (comme l'avance, la vitesse de coupe, le diamètre des trous, la géométrie des forets et les matériaux) sur les paramètres de sortie (par exemple, le facteur de délaminage (DF), le couple et la force de poussée (TF)) [146]

- [173-174-160-175-176-156-155-166-154], qui soulignent l'importance de l'optimisation des conditions basées sur ces paramètres pour obtenir un trou de bonne qualité dans les NFRC.
2. Approche sans délaminage : L'objectif principal de ces travaux de recherche était d'améliorer la qualité du perçage en minimisant le délaminage. [177-178-164-163-179-149].
  3. Impact du matériau et de la géométrie de l'outil sur la TF et la qualité du trou : Les études [180-165-181-148-178-151-182-183-150]; sont principalement axées sur l'importance du choix du matériau et de la géométrie de l'outil pour le perçage des NFRC afin d'obtenir de meilleures performances. La TF est étudiée systématiquement pour analyser son effet sur les dommages induits par le perçage.
  4. La durée de vie de l'outil et ses effets sur les performances de perçage : Les travaux de recherche [151-164-184] portent principalement sur la durée de vie de l'outil sans compromettre la qualité du trou. L'usure des outils a été examinée par rapport à la TF et au délaminage.

#### I.11.1.2 Méthodes de perçage non conventionnelles

Les techniques non conventionnelles telles que le perçage au laser offrent une alternative aux techniques de perçage conventionnelles en raison de l'absence d'usure de l'outil, de TF et de vibrations ou de claquement [185-186]. Cependant, le perçage au laser est une méthode thermique, donc un composite subit une abrasion en raison de l'interaction du laser pendant le perçage. La réduction des dommages thermiques et des défauts sont des défis critiques dans ce processus, qui peuvent être contrôlés par l'optimisation de la puissance et de la vitesse du laser. Une mauvaise sélection de ces variables peut causer des dommages à la surface du trou et diminuer la résistance mécanique. Par conséquent, l'optimisation des variables du processus est très importante pour obtenir la qualité souhaitée du trou.

Tewari et al. [169] ont mené une étude expérimentale sur le perçage de composites kenaf/HDPE par une technique de perçage au laser. Les variables d'entrée étaient la puissance (120, 127,5, 135 W), la vitesse (2, 3, 4 mm/s), et les variables de sortie étaient la rugosité de surface et l'angle de dépouille. Les auteurs ont indiqué qu'il y avait un impact critique de la puissance du laser et de la vitesse de coupe sur la rugosité de la surface, la zone affectée par la chaleur (HAZ) et l'angle de conicité du kerf. Une étude similaire a été réalisée par Jain et al. [168] sur un composite hybride basalte/époxy renforcé par des fibres de verre en utilisant une

machine laser (Figure I.17a). Ils ont utilisé trois paramètres principaux du processus : le courant de la lampe (160, 180, 200 A), la fréquence d'impulsion (20, 25, 30 Hz) et la pression air-gaz (8, 9 et 10 bars). Il a été rapporté que la circularité du trou et le HAZ augmentaient avec l'augmentation du courant de la lampe et de la fréquence des impulsions (Figure I.17a). Les conditions d'optimisation étaient de 0,663 (circularité du trou) et 72,695  $\mu\text{m}$  (HAZ) à 180 A, 25 Hz et 9 bars, ce qui a été fait par la méthodologie de surface de réponse et l'algorithme génétique multi-objectif.

Les méthodes d'usinage conventionnelles entraînent l'arrachement des fibres, l'enlèvement d'une grande partie de la matrice, une mauvaise finition de la surface et des dommages importants à la sous-surface, ce qui entraîne une rugosité plus élevée [187-148]. Ces problèmes d'usinage peuvent être résolus par l'AWJM, qui est 10 fois plus rapide que les techniques d'usinage conventionnelles [188]. Ce procédé de perçage ne génère pas de copeaux et ne provoque pas de délaminage plastique [189]. Les variables critiques du processus sont la vitesse de traverse, le débit massique, la distance d'écartement et la pression du jet d'eau abrasif. C'est la méthode d'usinage la plus appropriée pour les composites renforcés de fibres en raison de l'absence de la zone affectée par la chaleur (HAZ), qui est responsable de la distorsion thermique [190]. Il y a plusieurs études [170-172-191] disponibles dans la littérature qui ont montré la capacité de l'AWJM pour l'usinabilité des NFRC. Dhakal et al. [171] ont effectué le perçage de composites lin/époxy, carbone/époxy, hybride lin/carbone/époxy. La Figure I.18 décrit les fonctions de la buse pendant le perçage par AWJM. Les principales variables du perçage étaient la pression constante du jet d'eau (300 MPa), les vitesses de traverse (20, 40, 60 et 80 mm/min) et le diamètre du trou (10 mm). La vitesse de traverse est une variable critique du processus qui affecte de manière significative la rugosité de surface et le délaminage des composites. Le composite lin/époxy présentait le délaminage le plus faible et une rugosité de surface élevée par rapport aux autres composites testés.

### I.11.2 Paramètres du perçage

Les paramètres de processus sont essentiels pour le forage des CRNC, car la sélection des paramètres influe sur les performances de forage. Les principaux paramètres d'entrée de forage étaient la géométrie et le matériau du trou, le diamètre de l'outil, la vitesse de coupe et la vitesse d'alimentation. Les paramètres de sortie étaient le DF, le TF et le couple. Cependant, certains chercheurs ont utilisé l'usure et la rugosité de l'outil avec ces variables de

sortie. Comme le montre le tableau 2, les conditions d'optimisation (variables soulignées), le DF le plus bas trouvé à un taux d'alimentation plus faible et à une vitesse de coupe plus élevée. Bien que le TF, le couple et l'usure des outils étaient plus élevés à des taux d'avance plus élevés. La perceuse tournante était le choix le plus commun pour les chercheurs, avec des outils de forage spéciaux pour une excellente performance de forage.

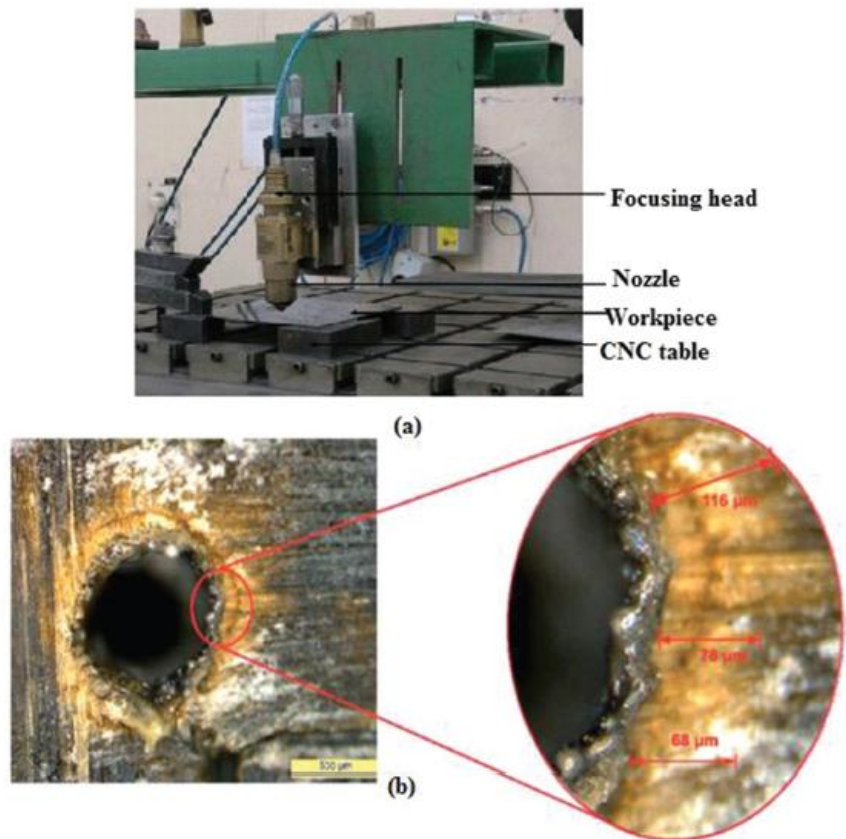


Figure I.17 (a) Montage expérimental d'un laser Nd-YAG, (b) zone affectée par la chaleur pour un courant de lampe de 180 ampères, une fréquence d'impulsion (30 Hz) et une pression d'air (8 bars), [168]

Habituellement, la plage de vitesse de coupe était de 500 à 2800 tr/min au cours du processus de forage ordinaire. Certaines études [160-163-162] ont été trouvées sur le forage à des vitesses plus élevées (3000 à 9000 tr/min). Le principal problème avec le forage à plus grande vitesse est l'usure de l'outil plus élevée et la température de coupe. Cependant, les CRNC ont montré une usure des outils plus faible que celle des composites de fibres synthétiques en raison de la faible abrasivité des fibres naturelles. Il pourrait être réduit au minimum en utilisant des forets enduits, et des liquides de refroidissement peuvent être appliqués pour réduire la température pendant le forage des CRNC.

### I.11.3 Mesures des paramètres de performance du perçage

Dans cette section, les paramètres les plus critiques, tels que le facteur de délamination, la force de poussée et la résistance résiduelle pour analyser le rendement du forage pour les CRN, sont examinés en détail.

#### I.11.3.1 Délaminage

La délamination est la forme de dommage de base dans les matériaux composites, pas tant à la lumière du fait qu'il se traduira par la structure de se briser en deux ou plusieurs parties, car il peut dégrader le stratifié au point qu'il devient futile en service. La division interfaciale causée par le délaminage peut conduire au flambage intempestif du stratifié, à la perte de vie en fatigue, à l'intrusion d'humidité, aux vibrations excessives et à la dégradation de la rigidité [192].

La délamination peut se dévoiler tout au long du contrôle ou dans un environnement de révision. Elle pourrait résulter d'un faible rythme, d'excentricités à l'intérieur du parcours de remplissage structurel et de discontinuités à l'intérieur des bâtiments qui stimulent un excès de contrainte plane.

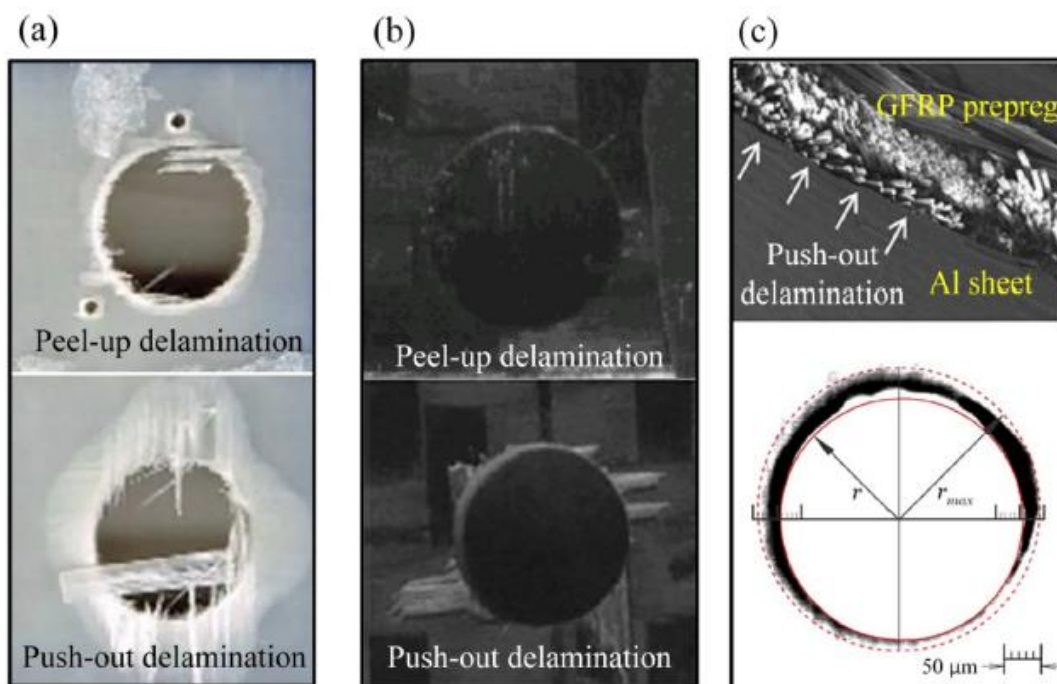


Figure I.18 quelques types des zones endommagées lors du perçage de l'UT-JFRP (a, c) entrée, et (b, d) sortie [155].

Aussi à l'intérieur de la non-existence d'un tel manque de continuité de délamination pourrait également résulter en charge de compression plane conduisant au flambage local.

Avec la charge mécanique, la température et l'humidité réelles pourraient également stimuler les contraintes interlaminaires dans un stratifié. La délamination peut aboutir à une redistribution des contraintes qui vont finalement encourager l'échec. L'énergie dévoilée avec la propagation autosimilaire de la fracture en ce qui concerne la durée  $a$  à celle particulière de la  $a + \Delta a$  en raison de l'exécution thermo-mécanique séquentielle est juste le travail forcé à proximité de la fracture réelle de la  $a + \Delta a$  durée pour vous à un. Le réglage du développement de la fracture comme le montre la [figure I.19](#), les soucis de vitalité révélés par le délaminage extensible est équivalent au travail forcé à proximité de la fracture réelle.

$$W = \frac{1}{2} \int_0^{\Delta\alpha} [\sigma_M(n) + \sigma_T(n)] [\delta_M(n - \Delta\alpha) + \delta_T(n - \Delta\alpha)] dn \quad (I.1)$$

Lorsque les indices T et M représentent respectivement les effets thermiques et mécaniques des spécifications indiquées.  $\sigma(x)$  est la contrainte au front de la fissure nécessaire pour fermer la zone délaminée et  $\delta(x - \Delta a)$  est le déplacement de l'ouverture de la fissure entre la surface delaminée supérieure et inférieure.

Pour un front de fissure à bords droits, le plan de courbure et normal est constant partout. Ainsi, la définition du mode est intuitive et constante pour l'ensemble du front. Ensuite, le taux d'énergie est calculé comme [193] :

$$G = \lim_{\Delta\alpha \rightarrow 0} \frac{W}{\Delta\alpha} \quad (I.2)$$

Les trois mécanismes de débit d'énergie de déformation pour les modes I, II et III sont les suivants :

$$G_I = \lim_{\Delta\alpha \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta\alpha} \int_0^{\Delta\alpha} [\sigma_{zzM}(n) + \sigma_{zzT}(n)] [\delta_{uzM}(n - \Delta\alpha) + \delta_{uzT}(n - \Delta\alpha)] dn \quad (I.3)$$

$$G_{II} = \lim_{\Delta\alpha \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta\alpha} \int_0^{\Delta\alpha} [\tau_{znM}(n) + \tau_{znT}(n)] [\delta_{unM}(n - \Delta\alpha) + \delta_{unT}(n - \Delta\alpha)] dn \quad (I.4)$$

$$G_{III} = \lim_{\Delta\alpha \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta\alpha} \int_0^{\Delta\alpha} [\tau_{zfM}(n) + \tau_{zfT}(n)] [\delta_{ufM}(n - \Delta\alpha) + \delta_{ufT}(n - \Delta\alpha)] dn \quad (I.5)$$

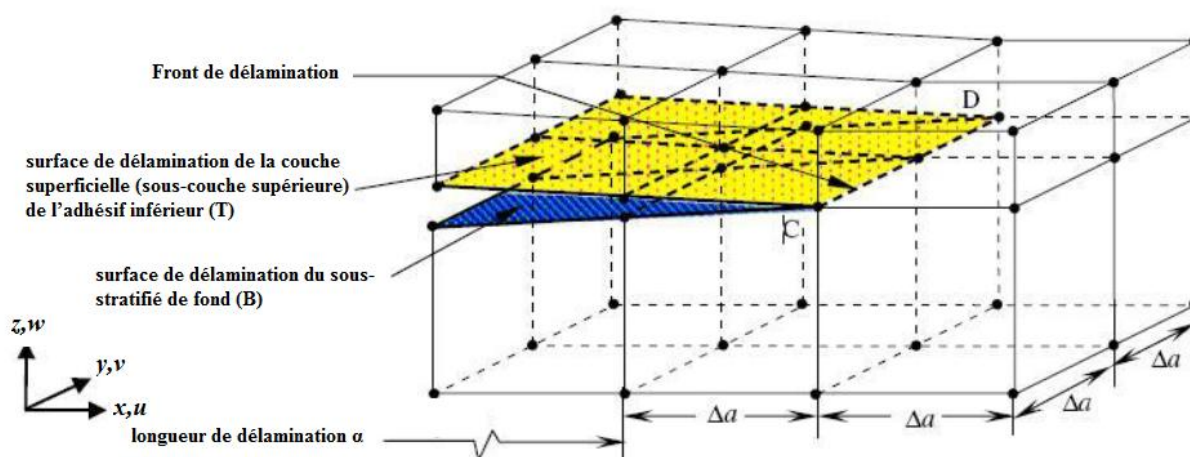


Figure I.19 Diagramme montrant un front de fissure.

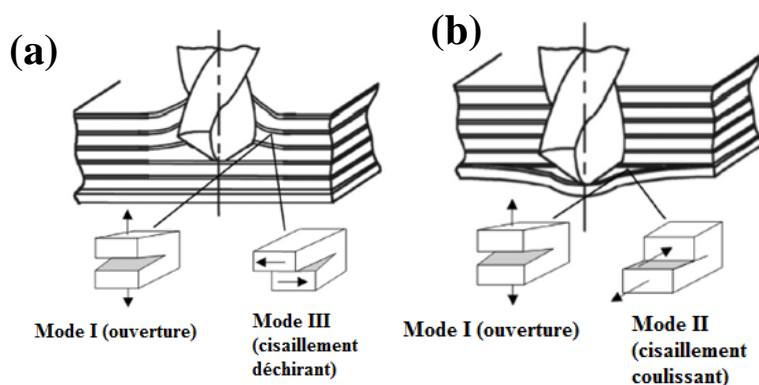


Figure I.20 Mécanisme de délaminacion dans le perçage des stratifiés composites : a) délaminacion par décollement et b) délaminacion par décollement (après [194-196]).

Tableau I.8 Différentes approches de mesure du délaminage des NFRC utilisées par de nombreux chercheurs.

Facteur du délaminage	Formule	Références
Facteur du délaminage Conventionnelle ( $Fd$ )	$Fd = D_{\max}/D$ , ou $D_{\max}$ et $D$ sont respectivement le diamètre maximal et le diamètre initial du trou.	[155-197-166-146-173-150-165-156]
Facteur du délaminage basé sur la largeur ( $Fd$ )	$Fd = W_{\max}/W$ , ou $W_{\max}$ et $W$ sont respectivement la largeur maximale et la largeur initiale de la zone endommagée.	[198]
Facteur du délaminage ( $Fd$ )	$Fd = A_{\max}/A_{\text{trou}}$ , ou $A_{\max}$ et $A_{\text{trou}}$ sont respectivement la surface maximale et la surface initiale du trou	[147]

### I.12 Désossage et retrait des fibres

La délamination peut se manifester tout au long de la transformation ou dans les conditions de service. Elle peut provenir de excentricités dans la charge structurale et de l'impact à basse vitesse. Dans l'expansion à la température, l'humidité et les charges mécaniques pourraient également actionner des contraintes interlaminaires à l'intérieur d'un stratifié. Cela pourrait être le résultat de contraintes thermiques résiduelles provoquées par des contraintes résiduelles et la transformation de la température faite par la rétention de l'humidité. La délamination peut subir une redistribution des contraintes.

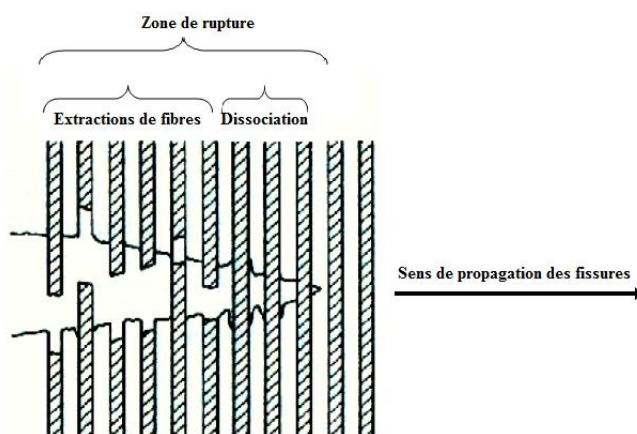


Figure I.21 L'extrémité de la fissure montre la direction de propagation de la fissure.

Chaque fois que les matériaux fragiles ont tendance à être bien collés à une matrice ductile, ces matériaux ont tendance à se casser avant l'extrémité de la fissure, laissant derrière eux des liens liés à la substance de la matrice qui frette vers le bas en plus de la fracture à l'intérieur d'une manière entièrement ductile. Ainsi que la plupart de ces mécanismes de défaillance locale, avec la réalisation de ce programme des deux stratifiés à l'intérieur d'un stratifié.

Avec les matériaux renforcés de fibres utilisant les deux matrices également cassantes en plus des matériaux cassants, la robustesse est évoluée de deux façons. Tout d'abord, si la fissure pourrait être complète pour fonctionner dans chaque fibre unique tout au long de sa trajectoire, vous verrez une grande quantité de marque surface récente conçue pour améliorer vraiment minuscule tout au long de la position de rupture verticale par rapport à la plus grande pression primaire -Résistance interfaciale- en plus d'obtenir ces matériaux pour aider à la fissuration dont ils ont besoin pour être éventuellement remplis pour leur résistance à la rupture et aussi cette demande fréquemment ajoutée à la variable communautaire, En outre, si les matériaux ont tendance à ne pas se fissurer, il convient de combler cette lacune par la suite

afin de faciliter l'extraction de ces matériaux. Avec les modèles géométriques, nous pouvons calculer l'entrée de chaque processus en termes de ténacité générale du composite [199].

### I.12.1 Microchargement matriciel

Le type très initial de fissure tout au long des stratifiés est normalement la microfissure matricielle. Il s'agit de fractures de plis qui traversent la profondeur réelle du travail en plus de fonctionner parallèlement aux fibres de la couche [200]. Les micro-dommages visibles les plus courants sont les dommages à l'intérieur de neuf cents couches lors d'une charge axiale à l'intérieur du trajet.

Ces types de microfractures ont tendance à être transversales en direction de la trajectoire de chargement et sont aussi généralement appelées fractures transversales réelles. Le cycle thermique, l'environnement, la charge de fatigue et la charge de traction peuvent tous être directement liés au développement de microchargements [201]. Microcracks sera formulaire d'application avec n'importe quelle couche qui a un composant important de votre populate appliquée transversale pour les fibres dans cette couche. Les microchargements conduisent à la dégradation des propriétés du stratifié, comme les changements dans les moduli efficaces, les rapports de Poisson, ainsi que les coefficients de dilatation thermique [202]. Bien que ces changements soient habituellement de petite taille, les microcircuits vont nucléer diverses autres formes comportant des dommages.

### I.12.2 Fracture de la fibre

Si la quantité de stress actuellement employée se démène pour finir par être permanent à partir du matériau tout le temps alloué sur la fibre de la matrice en raison de l'incapacité du développement de liens interfaciaux robustes, rupture des fibres peut bien avoir lieu. Cela tend à se produire dans le cas où la fibre de verre peut être correctement tenu de la matrice et vous serez et puis ce bris de la matière qui est souvent due au champ de déformation et de contrainte localisée du composite polymérique.

### I.13 Conclusion

La littérature a montré que les études sur les composites renforcés de fibres naturelles, ou biocomposites, avaient augmenté de façon spectaculaire au cours des dernières années en raison des avantages des fibres naturelles, comme la faible densité, le faible coût et la recyclabilité par rapport aux fibres synthétiques. Ce chapitre passe en revue les propriétés chimiques, physiques, mécaniques et thermiques des fibres naturelles, ainsi que les biocomposites.

Les biocomposites polymères renforcés de fibres naturelles sont très prometteurs pour les applications légères. Ces matériaux peuvent être utilisés pour des applications de haute technologie et ont des avantages particuliers comparé à certains composites renforcés de fibres, notamment une faible densité et une meilleure isolation thermique. Ces derniers constituent un domaine intéressant pour les chercheurs et les industries qui souhaitent créer des matériaux alternatifs efficaces, peu coûteux et respectueux de l'environnement.

# Chapitre II

TECHNIQUES ET  
METHODES  
EXPRIMENTALES

# Chapitre II.

## *TECHNIQUES ET METHODES EXPERIMENTALES*

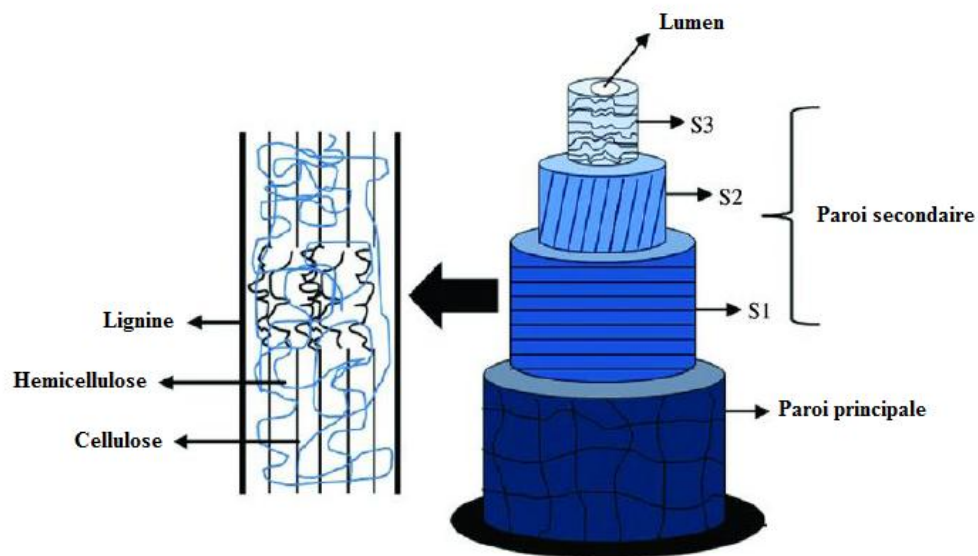
Contenu du chapitre	Page
Résumé .....	45
II.1 Introduction .....	46
II.2 Matériaux et méthodes .....	48
II.2.1 Fabrication de biocomposites.....	48
II.2.1.1 Matières premières utilisées .....	48
II.2.1.2 Fibres de jute .....	49
II.2.1.3 Résine époxy et durcisseur .....	49
II.2.2 Préparation des composites hybrides .....	50
II.3.1 Procédure expérimentale de perçage .....	52
II.3.2 Expérimental de design.....	54
II.4 Caractérisation des composites jute/résine .....	59
II.4.1 Essai de traction des stratifiés .....	60
II.4.2 Essai de flexion.....	61
II.4.2.1 Principe de l'essai.....	61
II.5 Caractérisation physique de la fibre de jute .....	62
II.5.1 Analyse par MEB des fibres de jute .....	62
II.5.2 Analyse de spectroscopie FTIR.....	62
II.5.3 Analyse DRX .....	63
II.6 Caractérisation thermique la fibre de jute .....	64
II.6.1 Analyse thermogravimétrique (TG-DSC).....	64
II.7 Conclusion.....	65

## Résumé

A l'heure actuelle de nombreux travaux consacrés aux propriétés mécaniques des fibres naturelles de micro à nano échelles pour fabriquer les biocomposites. Dans ceux-ci, pour étudier l'effet de ces fibres sur les propriétés mécaniques des matériaux composites. Dans ce chapitre, nous décrirons les techniques et les méthodes expérimentale utilisées dans cette étude, C'est-à-dire qu'il utilise la méthode pose à la main. Pour ce faire, il a d'abord été montré comment fabriquer cet échantillon. Ensuite, application les procédures expérimentales de perçage avec 27 essais par différent condition de paramètre, les échantillons forés ont été scannés à l'aide d'un scan haute résolution jusqu'à 2400 4800 dpi (profondeur de couleur interne de 48 bits) pour obtenir une image de haute qualité. En outre, dans ce chapitre, On a considéré trois groupes de niveaux, à savoir le diamètre du foret (d), la vitesse de la broche (N) et la vitesse d'avance (f), et trois niveaux dans chaque groupe pour déterminer les valeurs des paramètres de réponse ( $Fd_1, Fd_2, Fd_3$ ).

## II.1 Introduction

Les polymères ont remplacé de nombreux matériaux conventionnels dans diverses applications au cours des dernières décennies. Des recherches sont en cours dans le monde entier pour développer de nouveaux composites avec des combinaisons variées de fibres et de charges afin de les rendre utilisables dans différentes conditions opérationnelles. Dans la plupart de ces applications, les propriétés des polymères sont modifiées en utilisant des charges et des fibres pour répondre aux exigences de haute résistance / module élevé. La présence de micropores dans la paroi cellulaire pourrait causer des défauts de fabrication dans les composites [2], comme une défaillance interfaciale et des poches d'air. Une autre méthode efficace consiste à introduire des nanoparticules dans les micropores de la structure de la paroi de la cellule de fibre par un processus d'imprégnation pour remplir ces vides [Figure II.1](#).



[Figure II.1](#) Structure de la fibre naturelle [1].

La compatibilité entre les fibres naturelles hydrophiles et la polyoléfine hydrophobe a été un problème majeur pour le composite de polymère et de fibres naturelles [3-4]. Lee et al. [5] ont indiqué que les particules nanométriques déposées à la surface des fibres naturelles peuvent servir de sites de nucléation hétérogènes pour amorcer l'orientation cristalline de la matrice de polymères fondus. Ces résultats suggèrent que les nanoparticules pourraient contrôler la nucléation hétérogène d'un polymère semi-cristallin à la surface des fibres naturelles. La fibre naturelle elle-même ne peut pas initier les noyaux en raison de l'énergie libre extrêmement déséquilibrée entre les fibres cellulosiques et les matrices de polyoléfines fondus [5-6]. Par

conséquent, l'imprégnation de nanoparticules pourrait non seulement remplir les micropores de la structure de la paroi de la cellule de fibre minimisant les défauts de bulle d'air du composite de polymère de fibre naturelle, mais aussi introduire des nanoparticules sur les surfaces de fibre servant de force d'attraction aux manipulateurs de matrices de polymères pour améliorer la compatibilité aux interfaces de fibre et de polymère.

De nos jours, on utilise des particules dures composées de particules de céramique ou de métal et de fibres de verre pour améliorer considérablement les propriétés des matériaux composites, jusqu'à trois ordres de grandeur [7]. Divers types de polymères et de composites à matrice de polymères renforcés de particules métalliques ont un large éventail d'applications industrielles telles que les appareils de chauffage, les électrodes [18], les composites à haute température [19]. Ces composites techniques sont recherchés en raison de leur faible densité, de leur résistance élevée à la corrosion, de leur facilité de fabrication et de leur faible coût [8-9]. De même, les composites de polymères remplis de céramique ont fait l'objet de recherches approfondies au cours des deux dernières décennies. L'inclusion de charges inorganiques dans les polymères à des fins commerciales vise principalement à réduire les coûts et à améliorer la rigidité [10-11]. Charges particulières ont été trouvés pour bien fonctionner dans de nombreuses conditions opérationnelles réelles. Lorsque des particules de silice sont ajoutées à une matrice polymère pour former un composite, elles jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés électriques, mécaniques et thermiques des composites [12-13]. Actuellement, la taille des particules est réduite rapidement et de nombreuses études se sont concentrées sur la façon dont la taille d'une seule particule affecte les propriétés mécaniques [14-15]. Il a été constaté que la forme, la taille, la fraction volumique et la surface spécifique de ces particules ajoutées affectent considérablement les propriétés mécaniques des composites. À cet égard, Yamamoto et al. [15] ont signalé que la structure et la forme des particules de silice ont des effets importants sur les propriétés mécaniques comme la résistance à la fatigue, la résistance à la traction et les propriétés de rupture. Nakamura et al. [16-17] ont discuté des effets de la taille et de la forme des particules de silice sur la résistance et la ténacité à la rupture fondées sur l'adhérence de la matrice des particules et ont également constaté une augmentation de la flexion et de la résistance à la traction à mesure que la surface spécifique des particules augmentait.

## II.2 Matériaux et méthodes

### II.2.1 Fabrication de biocomposites

#### II.2.1.1 Matières premières utilisées

Dans ce travail, le renfort est constitué d'une fibre de jute bidirectionnelle [Figure III.1](#) avec une masse de surface de  $155\text{g/m}^2$  (28 x 23 fils/100 mm). La résine de polyester et le tissu de jute ont été obtenus de sources locales. Dans cette étude, nous avons utilisé une résine de polyester d'une densité de  $1,410\text{ kg/m}^3$ . Belaadi et al. [\[20\]](#) et Dobah et al. ont décrit la moyenne des propriétés mécaniques de traction de la résine de polyester utilisée dans ce travail [\[21\]](#) dans un travail précédent (32 MPa en résistance à la traction, 2,7 % en allongement et module de Young égal à 1,12 GPa). La préparation des échantillons de biocomposites (jute/polyester) stratifié est effectuée en utilisant le moulage de contact par le processus de mise à la main ; le tissu est préparé puis coupé aux dimensions de 280x280 mm. La biocomposites obtenue était une feuille rectangulaire de 280 mm de long, 280 mm de large et environ  $5,5 \pm 0,2$  mm d'épaisseur et sont constitués de cinq couches. En outre, les stratifiés de biocomposites ont atteint une teneur en fibres par poids de 30% poids. La résine polyester est catalysée et durcie dans des proportions d'environ 1 à 1,5 % en masse. L'ensemble (fibre/matrice) a durci et maintenu dans le moule sous pression atmosphérique standard (1 bar) jusqu'à la fin de la polymérisation pendant 24 heures à l'intérieur du moule à une température ambiante de 26 °C. Pour assurer le durcissement du mélange, les plaques ont été maintenues à l'air libre pendant 15 jours pour obtenir une polymérisation complète de la résine. Enfin, les échantillons ont été traités après cuisson à une température de 60 °C dans un four pendant 5 heures. Après la fabrication, les échantillons d'essai pour les expériences de forage ont été coupés aux dimensions suivantes 260 90 5,5 mm<sup>3</sup>. Les échantillons ont ensuite été séchés à l'air libre à température ambiante (23 °C) pendant 20 jours.

Les matières premières utilisées dans ce travail expérimental sont les suivantes :

1. Fibre de jute.
2. Résine époxy.
3. Durcisseur.

### II.2.1.2 Fibres de jute

Comme expliqué précédemment les fibres végétales naturelles ont attiré l'attention mondiale comme un renforcement potentiel pour le composite en raison de leur disponibilité facile comme ressource renouvelable, facilité de processus, faible densité, poids léger, non abrasif, peu coûteux et surtout pour leurs caractéristiques écologiques. La fibre de jute tissée utilisée pour la présente étude est montrée par la [figure II.2](#). Il s'agit d'une fibre libérienne importante et comprend un faisceau de cellules ultimes, chacune contenant des micro-fibrilles orientées en spirale liées ensemble. Le composant principal de la fibre de jute est la cellulose qui conduit à une plus grande rigidité. Les autres composants de la fibre de jute sont l'hémicellulose, la lignine, la pectine, la cire et les substances hydrosolubles. Dans le présent travail, des fibres de jute bidirectionnelles ont été utilisées pour l'expérimentation.



[Figure II.2](#) Tissu en fibre de jute produit par moi-même.

### II.2.1.3 Résine époxy et durcisseur

Les résines époxydes sont des prépolymères de poids moléculaire relativement bas qui peuvent être traités dans diverses conditions. Deux avantages importants de ces résines polyester insaturées sont :

Premièrement, ils peuvent être partiellement durcis et stockés dans cet état.

Deuxièmement, ils présentent un faible retrait pendant la cure. Cependant, la viscosité des résines époxy classiques est plus élevée et elles sont plus chères que les résines polyester. Les résines durcies ont une haute résistance chimique, à la corrosion, de bonnes propriétés mécaniques et thermiques, une adhérence exceptionnelle à une variété de substrats et de bonnes propriétés

électriques. Environ 45 % de la quantité totale de résines époxydiques produites est utilisée dans les revêtements protecteurs, tandis que le reste est utilisé dans des applications structurelles telles que les composites stratifiés, l'outillage, le moulage, la coulée, la construction et les adhésifs, etc.

### II.2.2 Préparation des composites hybrides

Des stratifiés hybrides de jute composite ont été préparés par la technique habituelle de pose manuelle à main. Un moule en bois de  $(30 \times 30 \times 5,5) \text{ mm}^3$  comme le montre la [figure II.3\(a\)](#) a été utilisé pour la fabrication de composites. Pour un retrait rapide et facile du composite, une feuille de démoulage est placée sur le dessus et le dessous du moule en bois. Le spray de démoulage est également appliqué sur la surface intérieure de la paroi du moule pour faciliter le retrait de l'échantillon composite. Une quantité calculée de résine époxy et de durcisseur (de 10% en poids) a été soigneusement mélangée avec un agitateur mécanique. Après 5 min d'agitation, un peu de mélange a été versé dans le moule uniformément, tissu de fibre de jute a été placé, puis la quantité requise de résine époxy a été versé sur elle. Le processus a été poursuivi pour fabriquer quatre couches de composite jute. Après avoir mis toutes les couches dans le moule, un rouleau a été utilisé pour rouler sur la fibre pour éliminer les bulles d'air, le cas échéant. Le moule a ensuite été pressé par le haut avec le poids mort pour mettre la pression sur le moule. Il a été conservé comme cela pendant 72h pour un durcissement approprié. Après 72 h, le moule a été retiré pour sortir la dalle composite. La même procédure a été poursuivie pour fabriquer des composites hybrides avec différentes séquences d'empilage de jute. Dans tous les échantillons fabriqués, on a pris soin de maintenir l'épaisseur à 5.5mm. L'échantillon pour les essais de perçage a ensuite été découpé selon la forme et la taille requises pour les essais mécaniques par un tailleur de la dalle composite.

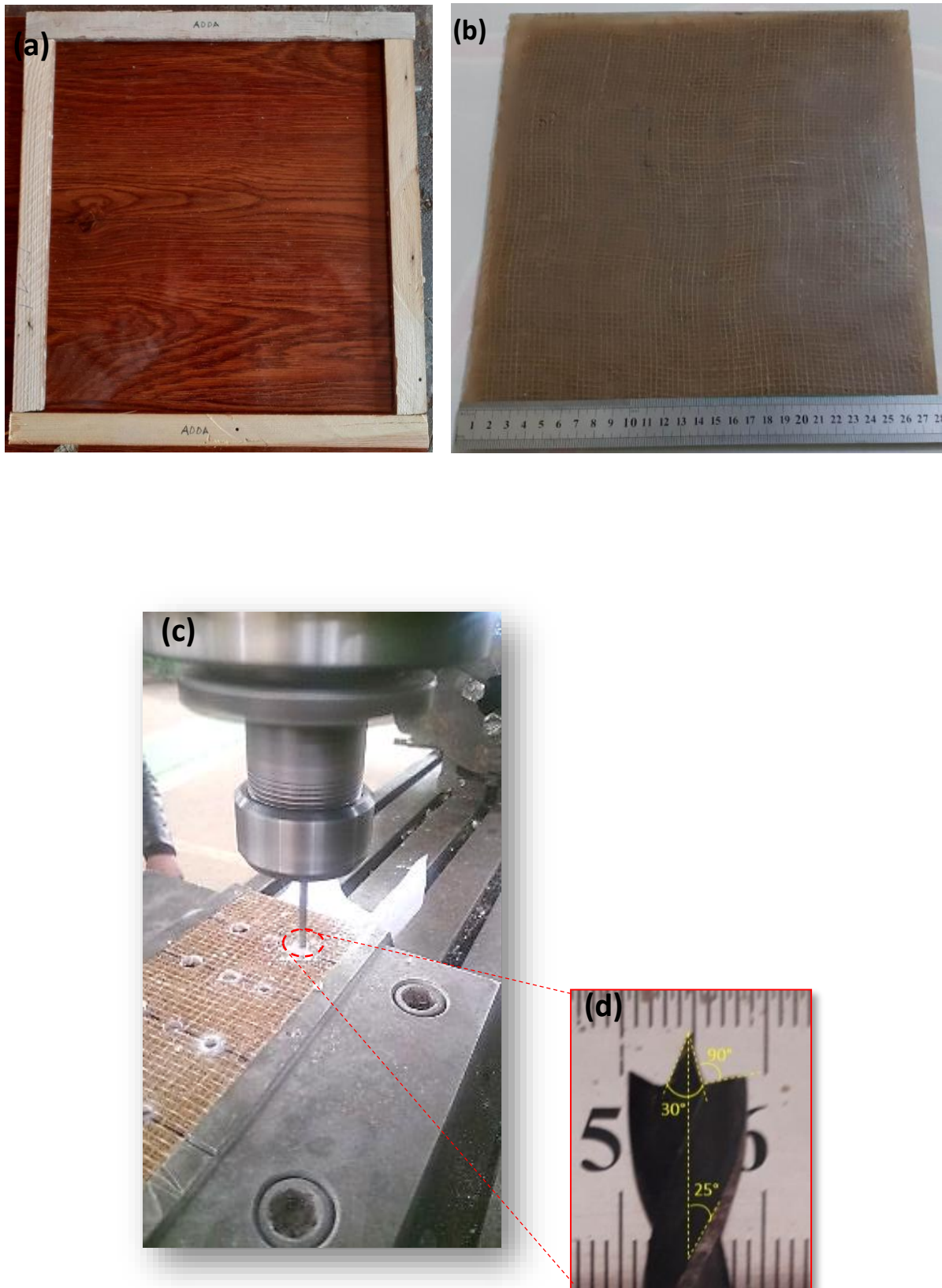


Figure II.3 (a) Moules utilisés pour la préparation des matériaux composites, (b) Photographie de la dalle composite, (c)(d) Photographie d'essais de perçage.

### II.3.1 Procédure expérimentale de perçage

Les essais de perçage ont été effectués à l'aide d'une fraiseuse universelle MOMAC équipée d'une broche de 1400 tours/min avec un débit d'alimentation de 4,6 à 1040 mm/rév [20-22] et tous les forages ont été effectués sur cette machine. Afin de réduire la flexion des pièces (et donc de ne pas introduire l'influence de ce paramètre structural dans l'étude) pendant la phase de forage afin de ne pas amplifier l'étendue du défaut à la sortie du trou, un support en acier solide est utilisé sous les pièces composites. Pour effectuer les essais de perçage, nous avons besoin d'une géométrie de taille de pièce à 260 x 90 x 5,5 mm<sup>3</sup> et un dispositif de fixation de la pièce est présenté dans la [Figure II.3\(c\)](#).

La perceuse Brad & Spur de différents diamètres (5 mm, 7 mm et 10 mm) a été utilisée dans cette étude, tandis que la forme et la géométrie de l'outil sont illustrées à la [Figure II.3\(d\)](#). Il est important de noter que le forage des trous dans cette étude se fait en une seule phase (étape). Pour avoir une bonne qualité de trou et éviter le facteur d'usure de l'outil de forage, après chaque quatre à cinq opérations, le foret est remplacé par un nouveau. Le forage a été effectué à sec sans liquide de refroidissement. D'autres paramètres sont également utilisés tels que les vitesses de broche de 355, 710 et 1400 tours/min et trois vitesses d'alimentation que nous avons choisies (50, 108 et 190 mm/min). Le choix des paramètres de coupe a été choisi après une étude bibliographique regroupée dans le [tableau II.1](#).

Ensuite, les échantillons forés ont été scannés à l'aide d'un scan haute résolution jusqu'à 2400 4800 dpi (profondeur de couleur interne de 48 bits) pour obtenir une image de haute qualité. Les images numériques obtenues ont été importées et traitées dans Image J (logiciel libre v1.47, publié par le National Institute of Health, États-Unis [23-25]) pour mesurer la zone de dommage au trou foré  $F_d$ , et le filtre de seuil est ajusté pour révéler le délaminage autour du trou. Le délaminage est l'un des défauts majeurs dans le perçage des composites stratifiés. La procédure de traitement utilisée pour obtenir les différentes zones de dommage d'un trou foré a été présentée à la [figure II.4](#). Les trois méthodes de calcul utilisées pour la détermination de  $F_d$  dans cette étude dans les différentes conditions d'utilisation sont présentées dans le [tableau II.2](#).

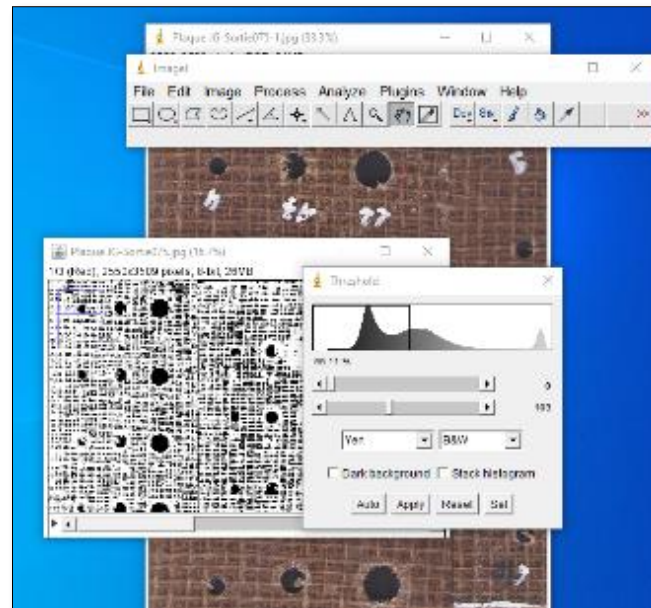


Figure II.4 méthode de mesure du délaminage après le scanne de la plaque biocomposite jute/epoxy.

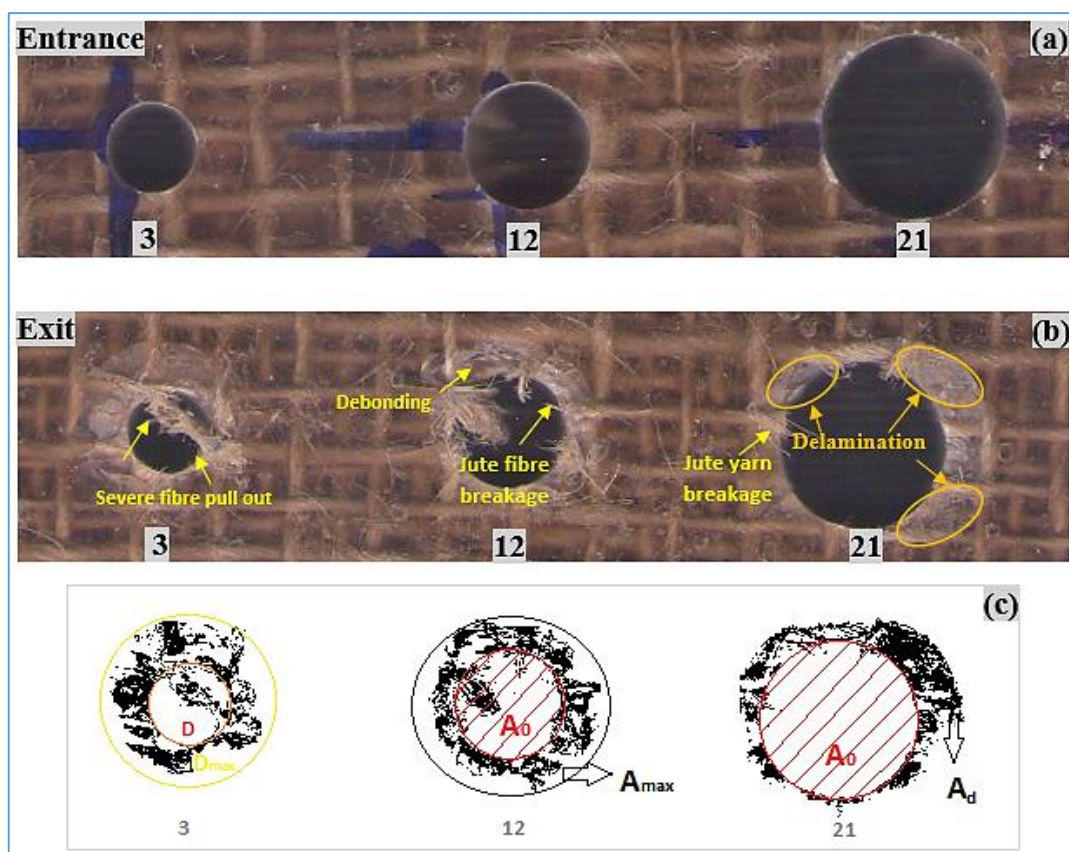


Figure II.5 types des Trous percés sur des biocomposites en toile de jute ou en polyester pour trois essais (#3, #12 and #21) : (a) entrée, (b) sortie et dommages typiques lors du forage et (c) détermination de différents paramètres pour le calcul des facteurs de délaminage au forage et de l'image obtenue avec le logiciel Image J.

### II.3.2 Expérimental de design

Le **Tableau II.3** présente les valeurs des paramètres de réponse ( $Fd_1, Fd_2, Fd_3$ ) déterminées sous différentes configurations expérimentales. La conception expérimentale de cette étude est un réseau orthogonal (L27) de plan composite central (CCD). Celui-ci a été adopté pour limiter le nombre d'expériences. Ainsi, les dépenses et le temps d'expérimentation seraient réduits. On a considéré trois groupes de niveaux, à savoir le diamètre du foret ( $d$ ), la vitesse de la broche ( $N$ ) et la vitesse d'avance ( $f$ ), et trois niveaux dans chaque groupe **Tableau II.4**.

**Tableau II.1** Différentes équations de mesure du facteur délamination [26–27].

Méthode d'estimation	Paramètre d'évaluation	Formule
$Fd_1$	Facteur de délamination (diamètre)	$F_d = \frac{D_{max}}{D}$
$Fd_2$	Facteur de délamination (diamètre)	$F_d = \frac{A_{max}}{A_0}$
$Fd_3$	Facteur de délamination (diamètre)	$F_d = \frac{A_d}{A_0}$
$A_0$ : zone de forage		$D$ : Diamètre nominal du trou percé
$A_d$ : zone de délamination à proximité du trou foré		$D_{max}$ : Diamètre maximal de délamination
$A_{max}$ : zone de délamination liée à $D_{max}$		$F_d$ : facteur de délamination classique

**Tableau II.2** Plan d'expérience orthogonal.

N°	Facteurs	Nomination	Unités	Niveau		
				L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
1	Vitesse de broche	$N$	rev/min	355	710	1400
2	Vitesse d'avance	$f$	mm/min	50	108	190
3	Diamètre de trou	$d$	mm	5	7	10

Tableau II.3 Résultats expérimentaux pour le facteur de délamination des trous forés à la sortie.

Numéro d'expérience	Variables entrée						Variables de sortie		
	$f$ (mm/min)	$N$ (rev/min)	$d$ (mm)	$f$ (mm/min)	$N$ (rev/min)	$d$ (mm)	$Fd_1$	$Fd_2$	$Fd_3$
1	-1	-1	-1	50	355	5	1,056	1,036	1,109
2	0	-1	-1	108	355	5	1,063	1,062	1,115
3	1	-1	-1	190	355	5	1,084	1,079	1,130
4	-1	0	-1	50	710	5	1,049	1,048	1,098
5	0	0	-1	108	710	5	1,060	1,058	1,105
6	1	0	-1	190	710	5	1,080	1,070	1,116
7	-1	1	-1	50	1400	5	1,047	1,036	1,085
8	0	1	-1	108	1400	5	1,060	1,040	1,098
9	1	1	-1	190	1400	5	1,070	1,050	1,111
10	-1	-1	0	50	355	7	1,075	1,051	1,132
11	0	-1	0	108	355	7	1,084	1,061	1,134
12	1	-1	0	190	355	7	1,097	1,074	1,138
13	-1	0	0	50	710	7	1,076	1,047	1,112
14	0	0	0	108	710	7	1,081	1,051	1,121
15	1	0	0	190	710	7	1,093	1,064	1,137
16	-1	1	0	50	1400	7	1,066	1,038	1,106
17	0	1	0	108	1400	7	1,068	1,043	1,115
18	1	1	0	190	1400	7	1,080	1,049	1,138
19	-1	-1	1	50	355	10	1,010	1,075	1,163
20	0	-1	1	108	355	10	1,017	1,080	1,165
21	1	-1	1	190	355	10	1,026	1,090	1,182
22	-1	0	1	50	710	10	1,020	1,074	1,147
23	0	0	1	108	710	10	1,027	1,079	1,165
24	1	0	1	190	710	10	1,026	1,079	1,172
25	-1	1	1	50	1400	10	1,024	1,060	1,138
26	0	1	1	108	1400	10	1,027	1,063	1,147
27	1	1	1	190	1400	10	1,026	1,063	1,171

**Tableau II.4** Paramètres de processus disponibles dans la littérature ouverte pour le perçage des composites polymères renforcés de fibres de jute.

Matrice	Fibre	Teneur en fibre(% w/w)	Paramètres de coupe				References
			Matériau de l'outil	Diamètre du foret <i>d</i> (mm)	Vitesse d'avance <i>f</i> (mm/tr)	Vitesse de coupe <i>N</i> (tr/min)	
Epoxy	Jute unidirectionnel	-	HSS forets hélicoïdaux	6, 8, 10	50, 150, 250 (mm/min)	1000, 2000, 3000	[28]
Polyester	Tissu de jute traité et non traité	30	HSS forets hélicoïdaux	6	0,03 0,06 0,09,12	9,42 15,07 20,7226,36 (m/min)	[29]
Epoxy et Polyester	Tissu de jute traité et non traité	30	HSS forets hélicoïdaux	6	0,03 0,06 0,09 0,12	500, 800, 1100, 1400	[30]
Polypropylène (PP)	Tissu de jute	30, 40, 50	forets hélicoïdaux les forets Jo, forets paraboliques	8	0,05 0,12,0,19	900, 1800, 2800	[31]
Epoxy	Tissu de jute	43	HSS forethélicoïdal CoroDrill 854,N <sub>2</sub> OC CoroDrill 856,N <sub>2</sub> OC	8	0,05 0,10 0,15	750, 1250, 1750	[27]
Polyester	Verre-sisal-jute	-	Brad & Spur, carbure revêtu	6, 9, 12	0,04,0,06 0,08	1000, 2000, 3000	[32]
Vinyle-ester	Vetiver- jute-verre non traité	-	forets hélicoïdaux, 60°, 90°,120°, 150°	10	0,1 0,2 0,3 0,4	500, 1000, 1500, 2000	[33]
Vinyle-ester	Traités (NaOH) Vetiver-jute-verre	-	forets hélicoïdaux, 60°, 90°,120°, 150°	10	0,1 0,2 0,3 0,4	500, 1000, 1500, 2000	[34]
Epoxy	Verre-lin-jute	-	Forets en carbure	6, 8, 10	0,1 0,2 0,3	600, 1200, 1800	[27]
Polyester	Fibre de jute courte 5, 10 et 15 mm	40	Forets Brad & Spur Foretshélicoïdaux	5, 7, 10	50, 108, 190 (mm/min)	355, 710, 1400	[35]
Epoxy	Tissu de jute (210 g/m <sup>2</sup> )	40	Forets Brad & Spur foretshélicoïdaux (HSS) forets hélicoïdaux (HSS-TiN)	5, 7, 10	50, 108, 190 (mm/min)	355, 710, 1400	[36]
Polyester	Tissu de jute et fibres d'acier	-	HSS, 90°,120°,150°	8,10,12	0,1 0,2 0,3	500, 1250, 2000	[37]
Polypropylène	Jute unidirectionnel	30	HSS, Co-HSS	2, 3, 4	0,1 0,2 0,3	600 12602700	[38]
Epoxy	Tissu de jute et lin	-	HSS, HSS-TiN, WC	4	0,01 0,015 0,020	2500, 5000, 7500	[39]
Epoxy	<b>Tissu de jute (160 g/m<sup>2</sup>) et liège</b>	<b>30</b>	<b>Forets Brad &amp; Spur foretshélicoïdaux(HSS-TiN)</b>	<b>5, 7, 10</b>	<b>50, 108, 190 (mm/min)</b>	<b>355, 710, 1400</b>	<b>Ce travail</b>

## II.4 Caractérisation des composites jute/résine

Avant l'essai de traction quasi statique sur un fil de jute [Figure II.6](#), les diamètres sont mesurés à dix endroits le long du fil à l'aide d'un microscope optique ZEISS équipé d'une caméra. La section transversale des fils de jute considérés comme circulaires est calculée à partir du diamètre moyen [\[41-42\]](#). Par conséquent, le diamètre moyen mesuré varie entre 500 et 1100  $\mu\text{m}$ . Ces fils sont produits avec une plage de torsion d'angle de surface de  $10^\circ$  à  $13^\circ$  et une densité linéaire de 27 021 tex (g/1000 m). Plus de 30 échantillons sont analysés à une température de 26  $^\circ\text{C}$  et une humidité relative de 49 %. Les propriétés mécaniques du fil sont déterminées conformément à la norme ASTM D2256-01 [\[43\]](#). Les essais de traction sur fil de jute sont effectués sur une machine de traction de type Zwick / Roell avec une capacité de 2,5 kN et une vitesse constante de 1 mm/min avec une longueur de jauge (GL) de 150 mm. L'essai mécanique de ces biocomposites a été effectué sur une machine d'essai Zwick / Roell avec un dynamomètre de 50 kN. Les essais de traction et de flexion du biocomposite jute/époxy ont été effectués conformément aux normes ASTM 3039 M 14 [\[44\]](#) et ASTM 790 [\[45\]](#) à une vitesse constante de 1 mm/min à 26  $^\circ\text{C}$  de température ambiante et 49 % d'humidité relative, respectivement.

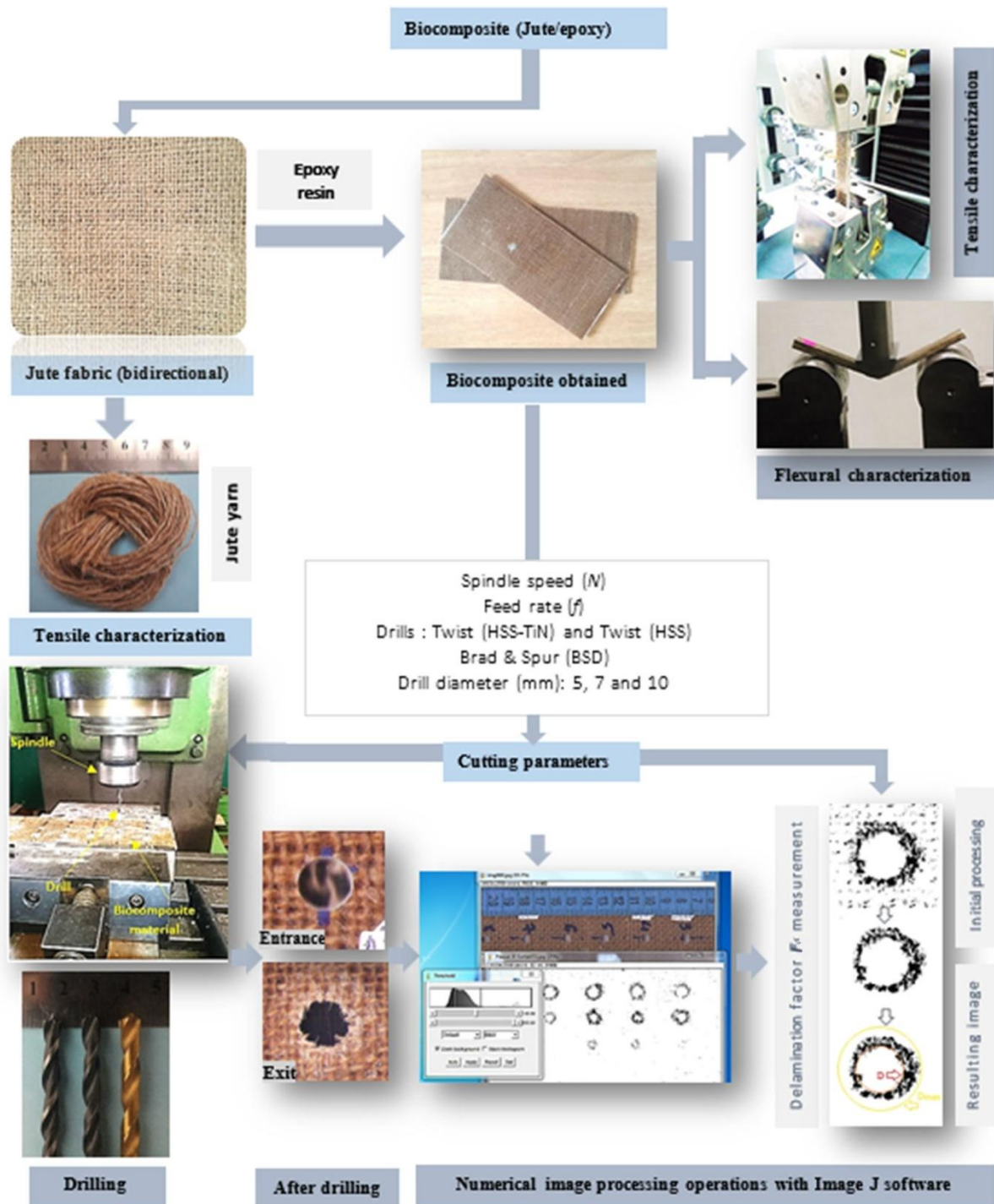


Figure II.6 Schéma de la configuration expérimentale et mesure du facteur de délamination.

#### II.4.1 Essai de traction des stratifiés

Le besoin de connaître les caractéristiques mécaniques des stratifiés (jute/résine) pour l'étude numérique a conduit à la réalisation de nombreux essais expérimentaux. L'essai de traction est l'essai le plus utilisé pour la caractérisation du comportement des composites en raison de sa facilité de traitement et d'analyse des résultats. Pratiquement, cet essai permet de déterminer le

module élastique, la limite élastique, la résistance maximale en traction et le coefficient de Poisson. En outre, il permet d'établir des lois de comportement fiables et présente une bonne reproductivité des essais.

## II.4.2 Essai de flexion

### II.4.2.1 Principe de l'essai

Les essais de flexion sur poutre courte sont réalisés sur des éprouvettes rectangulaires de section  $S = 28 \times 9 \text{ mm}^2$  reposant sur des appuis inférieurs distant de  $27.5 \text{ mm}$  (5 fois l'épaisseur). On note 1 et 2 respectivement les directions des torons dans le sens chaîne et trame et 3 celle selon l'épaisseur (axe de chargement). Sous l'action du chargement l'état de contrainte généré s'exprime par le tenseur suivant :

$$\sigma = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \sigma_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ \sigma_{13} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

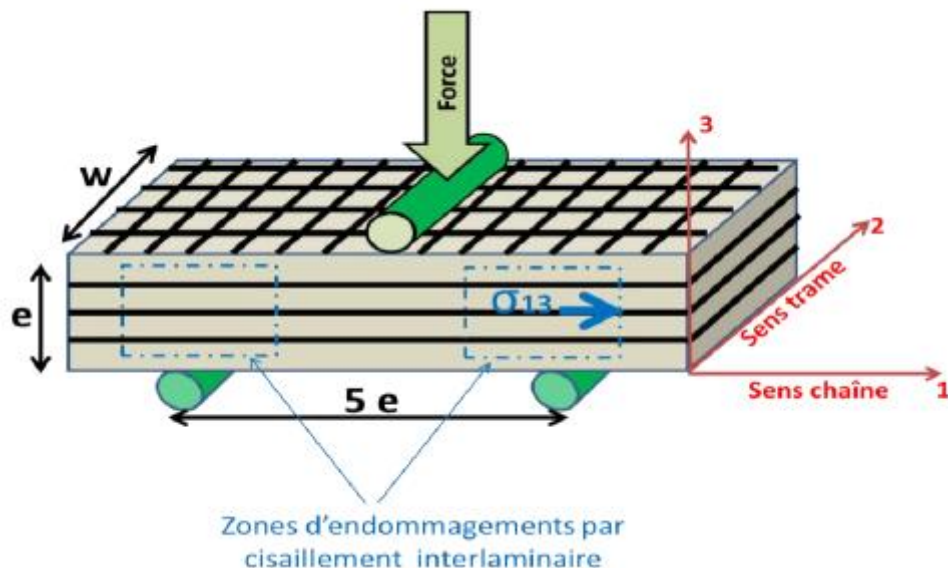


Figure II.7 Principe de l'essai de flexion des poutres courtes : représentation schématique des zones endommagées par cisaillement interlaminaire.

## II.5 Caractérisation physique de la fibre de jute

### II.5.1 Analyse par MEB des fibres de jute

La morphologie des surfaces de fibres de jute a été étudiée à l'aide du microscope électronique à balayage à émission de champ (FESEM) dans laboratoire CRAPC à Alger. Les échantillons ont été fixés sur le port-échantillons en utilisant la laque d'argent, comme ils ne sont pas conducteurs (électriquement), ils ont été métallisés à l'or-palladium (Au-Pd) dans un pulvérisateur cathodique, pour éviter l'effet de charge une fois bombardés par le faisceau d'électrons du MEB. Il est bien établi que les chaînes cellulosiques des fibres naturelles sont fortement liées par des constituants chimiques, la lignine et l'hémicellulose, ce qui entraîne la formation de fibres multicellulaires [40].



Figure II.8 Microscope électronique à balayage utilisé dans ce travail (laboratoire CRAPC à Alger).

### II.5.2 Analyse de spectroscopie FTIR

La spectroscopie FTIR a été effectuée pour déterminer le groupe fonctionnel de fibre de jute. La mesure FTIR a été effectuée à l'aide d'un spectromètre dans le laboratoire d'analyse MEMP a COSTANTINE (école polytechnique). L'analyse des fonctions chimiques des échantillons a été effectuée par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier à l'aide d'un

dispositif Perkin Elmer Spectrum RX1. Les paramètres de test sont : balayage 32 avec une plage spectrale de 500 à 4000  $\text{cm}^{-1}$  en mode transmission à 4  $\text{cm}^{-1}$ .



Figure II.9 Appareil de Spectroscopie FTIR.

### II.5.3 Analyse DRX

La diffraction des rayons X a été effectuée pour évaluer la structure cristallographique de matériaux semi-cristallins tels que la fibre cylindrique de jute et pour déterminer le changement du caractère cristallin du matériau. L'étude structurale des échantillons par DRX est réalisée avec un dispositif du type Bruker D8 ECO équipé d'un tube anticathode en cuivre avec une longueur d'onde  $K\alpha_1 = 0,15406 \text{ nm}$ . Les paramètres expérimentaux sont : courant  $I = 20 \text{ mA}$ , tension  $U = 40 \text{ kV}$ ,  $2\theta = 5$  à  $80^\circ$  avec rotation =  $2^\circ/\text{min}$ . Les résultats XRD ont été analysés par le logiciel EVA. La taille cristalline a été mesurée à l'aide de Scherer définie par l'équation Eq. 1 [46]. Où :  $D$  = taille cristalline (nm),  $k = 0,9$  (constante de Scherer),  $\lambda$  = longueur d'onde ( $0,1541 \text{ nm}$  pour  $K\alpha$  (cuivre)),  $\beta$  = FWHM (radians) et  $\theta$  = position de crête (radians). L'indice de cristallinité (IC) a été obtenu selon la méthode empirique de Segal et al. [47], en calculant le rapport entre la surface cristallisée et la surface totale, comme le montre l'équation II.1. Où :  $I_{002}$  : l'intensité maximale de la région cristalline et  $I_{am}$  : l'intensité la plus faible de la région amorphe.

$$D = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos(\theta)} \quad (\text{II.1})$$

$$CI \% = \left[ \frac{I_{200} - I_{am}}{I_{200}} \right] \times 100 \quad (\text{II.2})$$



Figure II.10 : Appareil de diffraction des rayons X.

## II.6 Caractérisation thermique la fibre de jute

### II.6.1 Analyse thermogravimétrique (TG-DSC)

Une analyse thermogravimétrique a été effectuée sur des composites époxy jute cylindrique, en COSTANTINE dans laboratoire d'analyse MEMP (école polytechnique), l'application d'un taux de chauffage de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  de  $25$  jusqu'à  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . la masse des échantillons est de  $10$  à  $30\text{ mg}$  sous flux d'azote



Figure II.11 Appareil DSC-TG.

## II.7 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la caractérisation expérimentale des stratifiés sous chargement de traction et de flexion. Après avoir réalisé les essais de traction et de flexion sur les éprouvettes jute/résine, les résultats obtenus ont mis en évidence l'influence de l'orientation des fibres et de la taille des stratifiés sur la réponse mécanique et l'endommagement des stratifiés jute/résine. Les résultats ont permis d'identifier avec précision l'évolution de l'endommagement et ont montré aussi que les modules de Young déterminés dans la direction longitudinale sont similaires à ceux déterminés dans la direction transversale. Ces tests ont permis de définir la résistance, les déformations et la dégradation que peuvent subir les stratifiés en jute/résine sous différents types de chargement.

# Chapitre III

RESULTATS THERMO-  
PHYSICO-CHIMIQUE

## **Chapitre III.**

### ***RESULTATS THERMO-PHYSICO-CHIMIQUE***

<b>Table des matières</b>	<b>page</b>
Résumé.....	66
III.1 Introduction.....	67
III.2 Résultats et discussions.....	68
III.2.1 Propriétés mécaniques des fils de jute .....	68
III.2.2 Propriétés de traction et de flexion de biocomposites.....	76
III.3 Caractérisation physique de la fibre de jute .....	77
III.3.1 Résultats d'analyse MEB des fibres de jute.....	77
III.3.2 Résultats d'analyses spectroscopiques FTIR .....	78
III.3.3 Résultats d'analyses diffraction des rayons X (DRX) .....	79
III.4 Caractérisation thermique de la fibre de jute.....	80
III.4.1 Résultats d'analyses thermogravimétrique (TGA) .....	80
III.5 Conclusion .....	82

## Résumé

L'endommagement des matériaux composites fait l'objet de nombreuses études depuis plus de 20 ans. Le but de ces études est de permettre un dimensionnement plus fin des structures en tenant compte des phénomènes d'endommagement amenant à la détérioration du matériau, en effet, ce chapitre est consacré à un état de l'art portant sur les résultats le comportement mécanique des composites constitués d'une matrice polymère et de fibres longues. Nous avons accordé une attention particulière à la caractérisation de la qualité d'adhésion fibre-matrice. Le chapitre est organisé de la façon suivante : Tout d'abord nous présentons brièvement les résultats des essais normalisés permettant de caractériser le comportement mécanique des composites à l'échelle macroscopique. La seconde partie est complémentaire de la première : nous décrivons certaines techniques d'analyse qui sont utilisées pour observer et étudier les mécanismes de déformation et d'endommagement aux échelles locales en réponse à une sollicitation macroscopique.

### III.I Introduction

Contrairement aux matériaux métalliques, les composites présentent des propriétés mécaniques différentes suivant les différentes directions en raison de l'orientation des fibres dans la matrice (anisotropie). Les recherches effectuées sur les composites, montrent que la taille des éprouvettes et l'orientation des fibres influent sur leurs propriétés mécaniques. C'est sur ces deux derniers points, que des essais mécaniques sur des éprouvettes jute/résine ont été effectués dans le but d'obtenir des données précises pour une utilisation spécifique. La réalisation des essais expérimentaux sur des composites à matrice résine renforcés de tissus en jute constitue une étape importante dans la procédure d'identification des paramètres des lois de comportements. Ces essais fournissent également des informations (des données) pour l'analyse et la conception de ces matériaux.

Dans ce chapitre et dans un premier temps un type de sollicitation correspondant à un essai mécanique conventionnel qui est l'essai de traction a été retenu. Les résultats obtenus vont permettre de donner quelques informations sur l'évolution de certaines propriétés mécaniques avec l'endommagement de ces stratifiés jute/résine.

## III.2 Résultats et discussions

### III.2.1 Propriétés mécaniques des fils de jute

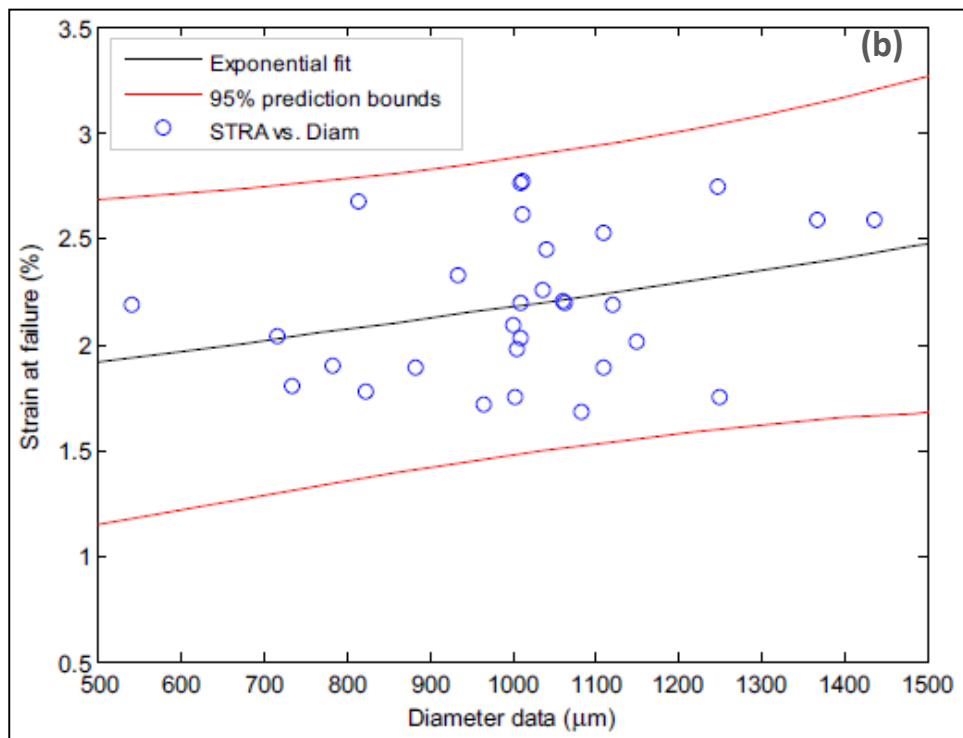
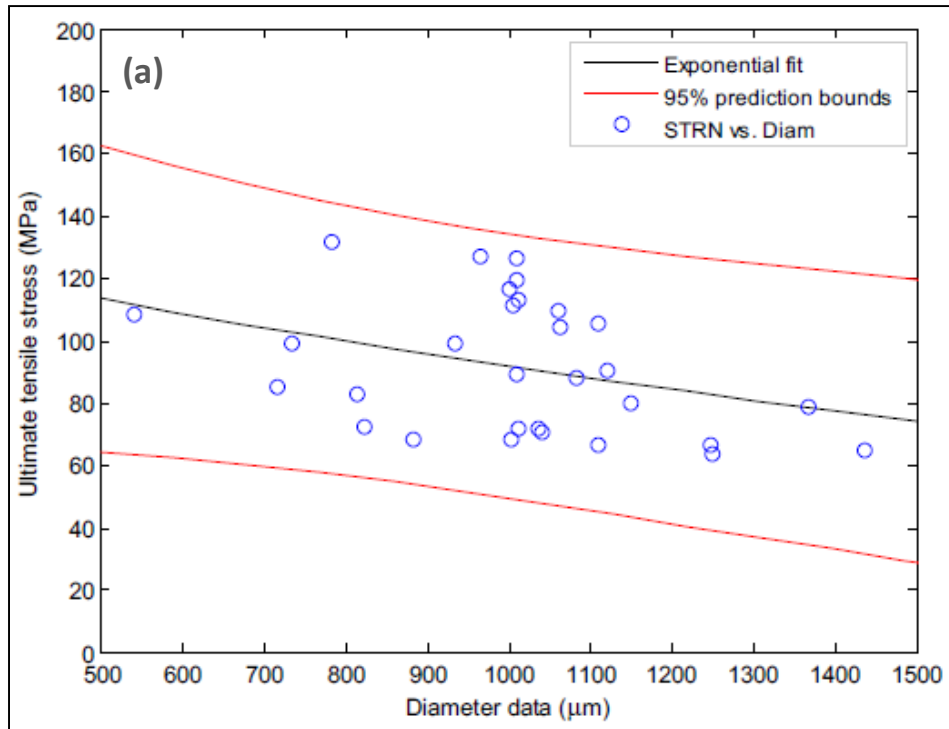
Trente fils de jute ont été utilisés dans ce travail. Ce nombre est justifié dans la littérature par plusieurs auteurs [1-2] qui ont étudié l'analyse de la distribution de Weibull pour des données expérimentales obtenues de l'essai de traction sur les fibres cellulosiques pour une utilisation ultérieure dans le renforcement des biocomposites. Les analyses statistiques telles que deux analyses Weibull et la probabilité de survie à un niveau de confiance de 95% CI ont été effectuées dans le logiciel Minitab. La figure III.1 montre le nuage ponctuel des propriétés mécaniques des 30 essais de fil de jute dont la longueur de mesure GL est (150 mm) décrivant un modèle de prédiction exponentielle à un niveau de confiance de 95 % (erreur de 5%). La figure III.1 (a-c) représente la relation entre les propriétés mécaniques (résistance, déformation et module de Young) et le diamètre du fil de jute. De plus, les résultats indiquent une dispersion importante des propriétés. La dispersion des valeurs des propriétés mécaniques pourrait être due à des défauts internes du fil de jute.

**Tableau III.1** Résultats des propriétés mécaniques disponibles dans la littérature ouverte sur différents fils végétaux.

Fil	GL (mm)	Élasticité (Mpa)	Souche (%)	Module de Young's	Référence
Chanvre	50	449.9	4.28	11 910	[3]
Lin	500	22445.5	1-3	11 400 ± 2110	[4]
Lin	100	198.1	3.22	5913.6	[5]
Chanvre	100	124.1	2.94	4236.9	[5]
Jute	100	74.8	0.03	2769.7	[5]
Coco	100	51.8	0.16	322.1	[5]
Sisal	100	31.5	0.38	85.2	[5]
Sisal	150	141.86 ± 28.77	6.39 ± 0.59	792.93 ± 232.44	[1]
Jute	50	117.70 ± 27.77	4.39 ± 0.69	19.78 ± 4.98	[2]
Jute	150	91.69 ± 21.38	2.18 ± 0.34	3163 ± 994	Ce travail

Le tableau III.1 montre les valeurs moyennes des propriétés mécaniques (résistance à la traction, déformation et module de Young) des fils de jute et autres fibres cellulosiques tirées

de la littérature [1-3]. L'analyse des résultats obtenus a permis de révéler que la résistance moyenne est égale à 91,69 21,38 MPa, la souche moyenne est de 2,18 0,34 % et le module de Young est d'environ 3163 994 MPa pour 30 échantillons testés qui avaient une longueur d'écartement ( $GL = 150$  mm). Ces valeurs (résistance et module de Young) représentent des augmentations de l'ordre de 22,5 % et 14,20 %, respectivement, par rapport aux résultats de Codispoti et al. [5] pour les fils de jute d'une longueur  $GL = 100$  mm. Les résultats expérimentaux ainsi obtenus des propriétés mécaniques du fil de jute sont proches des résultats trouvés dans la littérature [3-6]. La figure III.2 montre l'analyse statistique des propriétés mécaniques de traction des fils de jute à  $GL = 150$  mm avec la comparaison des différentes méthodes de distribution (Weibull, distribution normale, lognormale et logistique). Il est à noter que pour les données de diamètre, la distribution de lognormal est plus représentative des valeurs réelles, tandis que le module de Young et les données de résistance indiquent que la distribution de Weibull est plus représentative des valeurs réelles. Pour valider les résultats obtenus expérimentalement, une analyse statistique a été envisagée, d'où l'application de la théorie de Weibull à deux paramètres en utilisant Minitab 16. La figure III.3 (a–c) montre que la distribution de Weibull avec deux paramètres décrit de manière satisfaisante les propriétés mécaniques (résistance, déformation et module de Young). Cette méthode a permis d'estimer les valeurs caractéristiques ( $\sigma_0$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $E_0$ ) qui sont de l'ordre de 89,69 MPa, 2,15% et 3,07 GPa, respectivement, tandis que les modules de Weibull ( $m_\sigma$ ,  $m_\varepsilon$ ,  $m_E$ ) sont de l'ordre de 5,34, 7,80 et 3,80, respectivement. La figure III.3 (d–f) montre l'évolution de la probabilité de survie en fonction des propriétés mécaniques, à savoir la résistance à la traction, la contrainte à la rupture et le module de Young en utilisant la méthode d'estimation LS. On a observé par exemple que 50 % ( $P(\sigma) = 0,5$ ) de survie de l'échantillon pour une population de fils de jute, la résistance à la traction ultime est estimée à 90 MPa, ce qui coïncide avec la valeur expérimentale moyenne déterminée ( $\sigma = 91,69$  MPa).



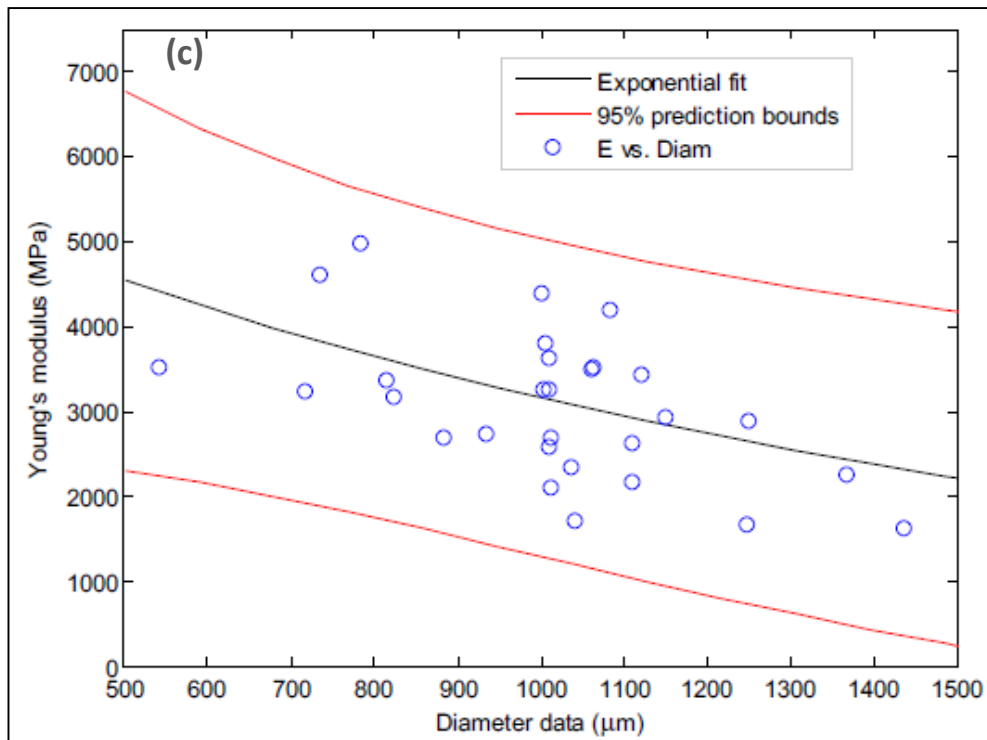
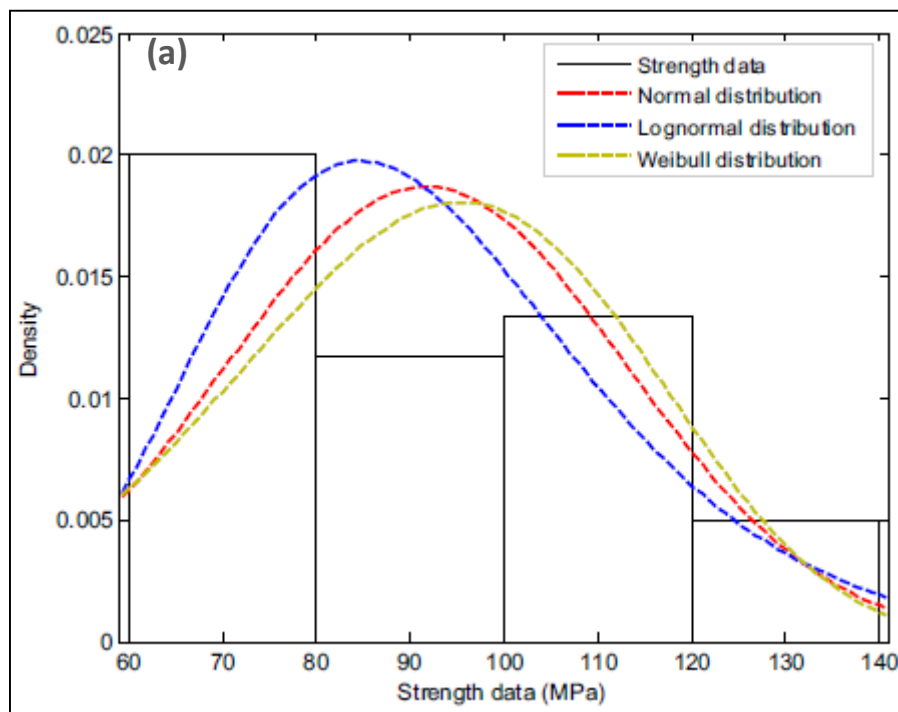
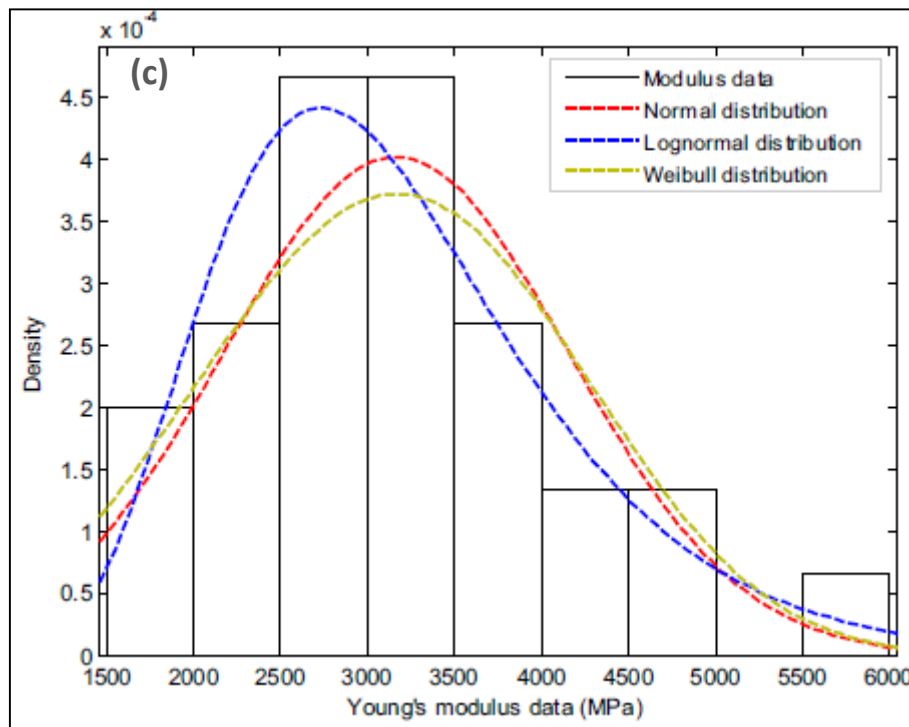
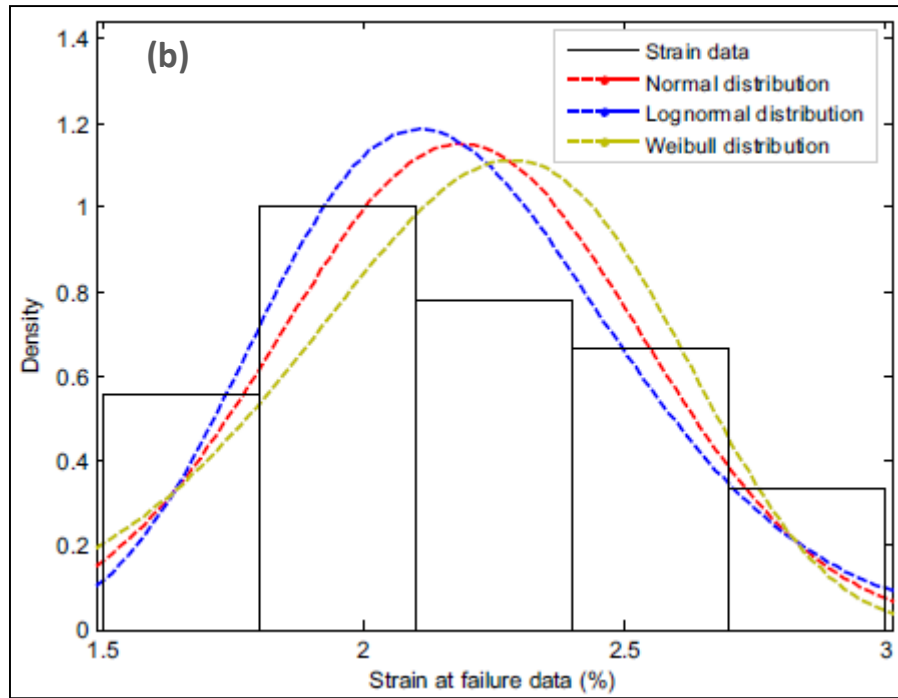


Figure III.1(a) Données sur la résistance à la traction ultime, (b) Données sur la déformation à la rupture et (c) Données du module de Young par rapport aux données sur le diamètre pour tous les essais des fils de jute [22].





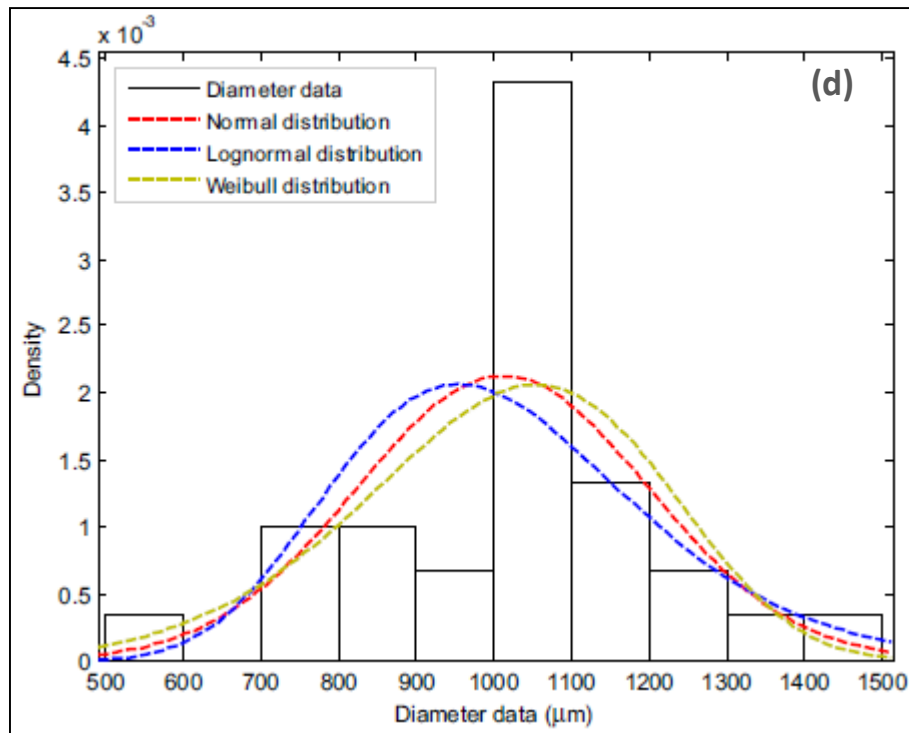
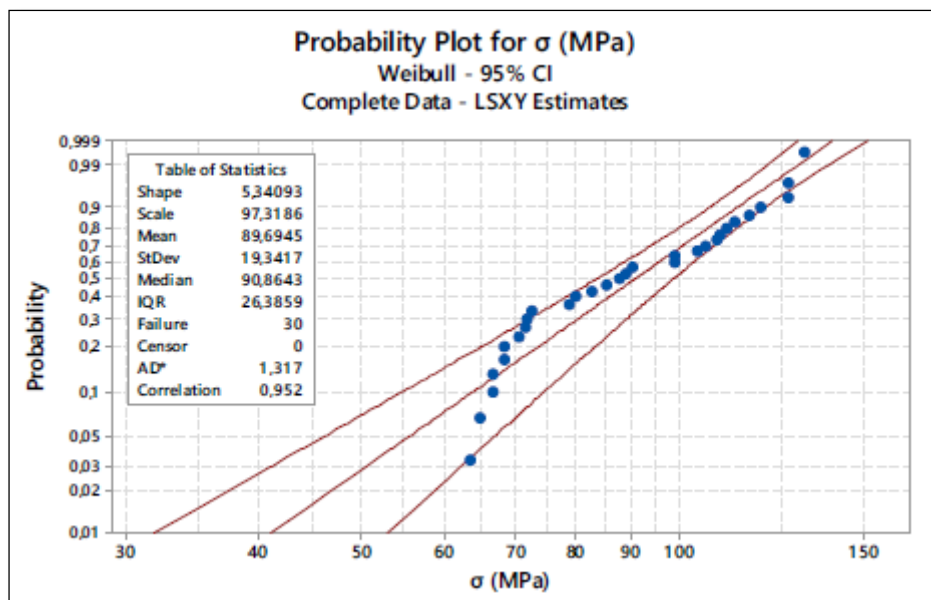
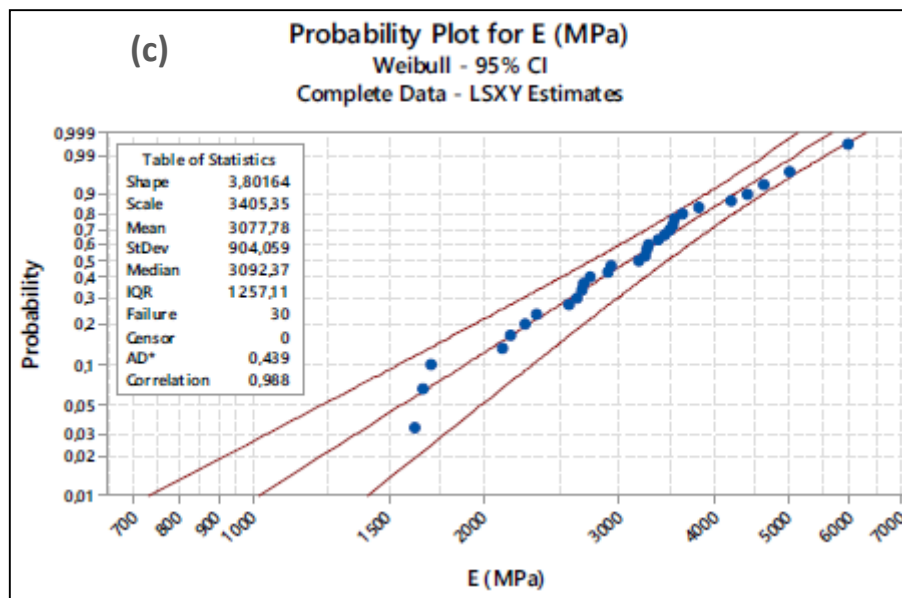
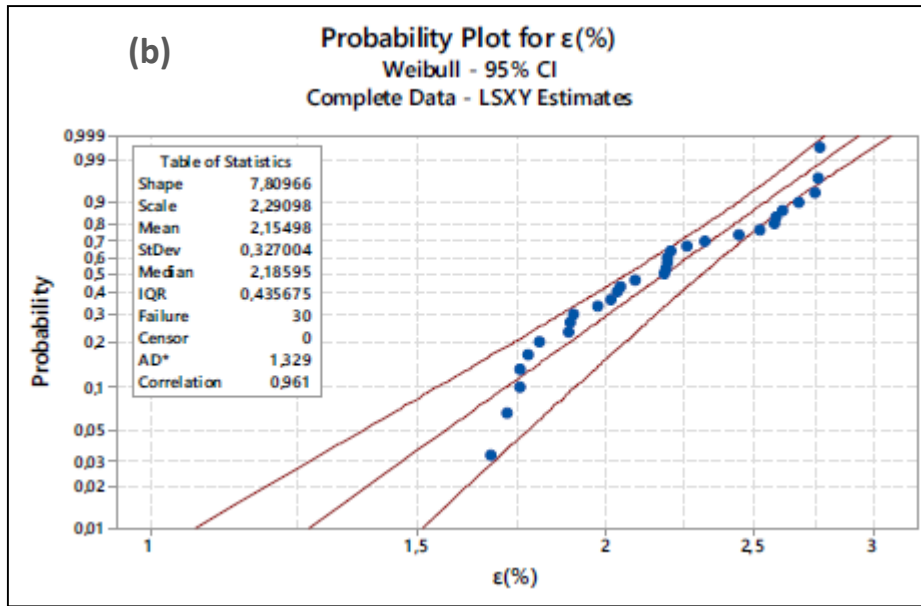
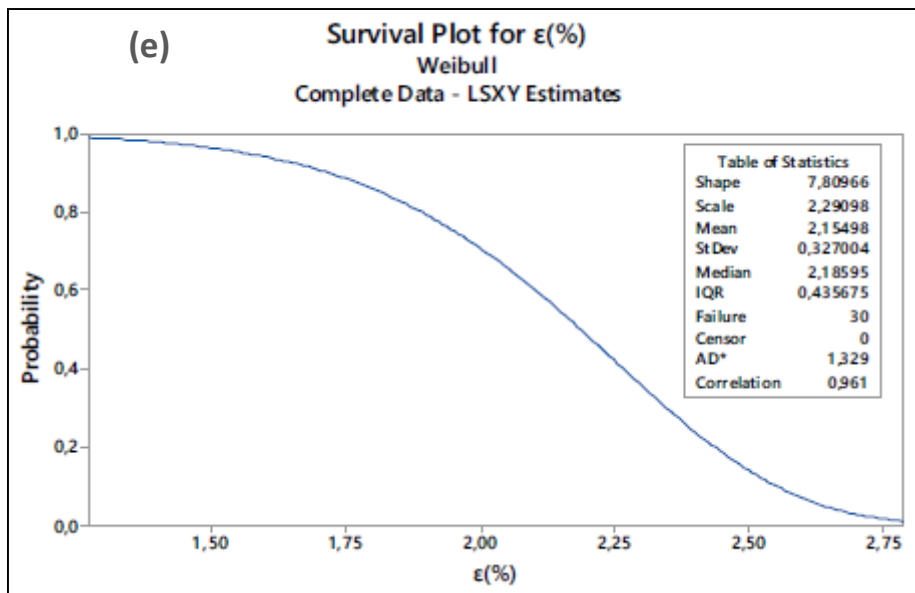
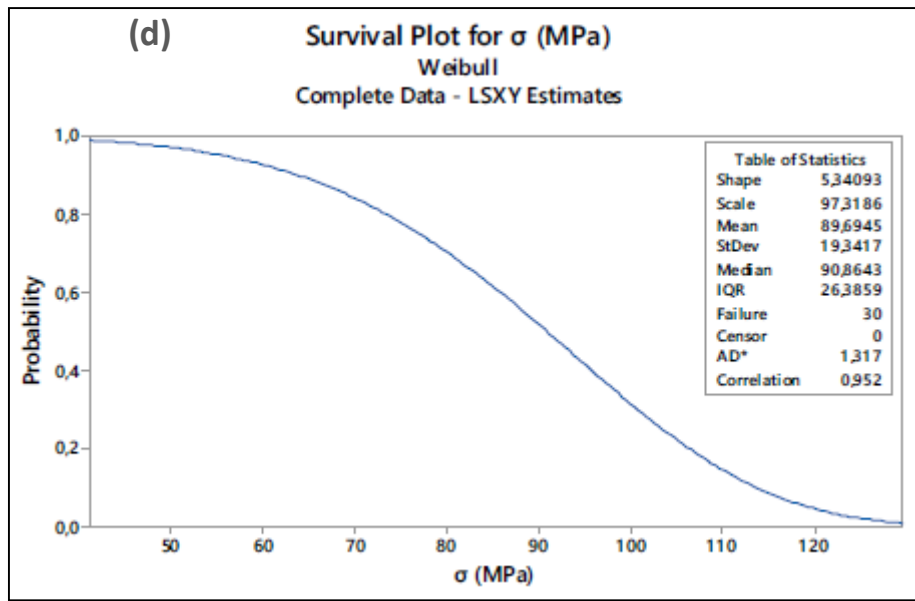


Figure III.2 Analyse statistique des propriétés mécaniques de traction des fils de jute à GL = 150 mm avec comparaison pour les différentes méthodes de distribution (a) données de résistance à la traction, (b) données de déformation à la rupture, (c) données du module de Young et (d) diamètre du fil [22].







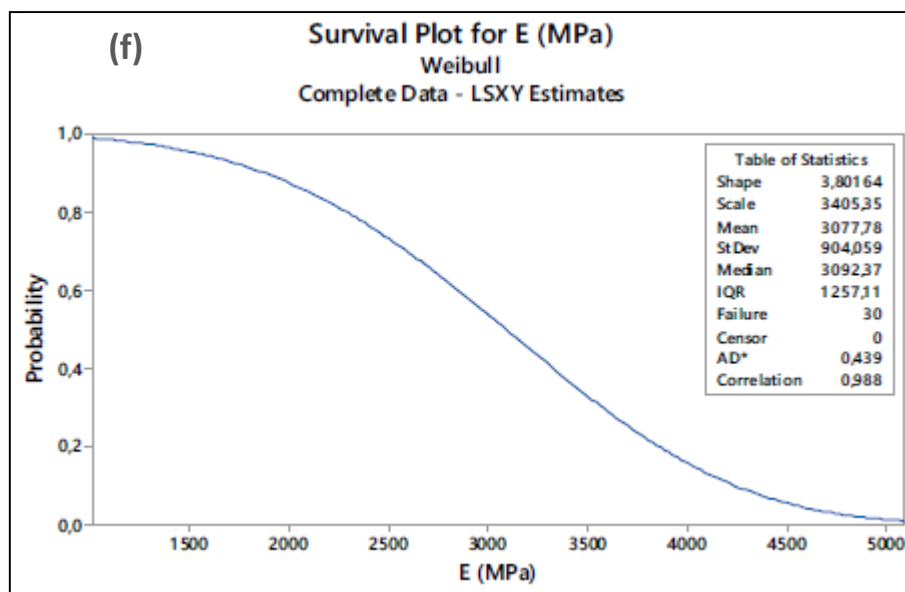


Figure III.3 (a–c) Distribution de Weibull à deux paramètres et (d–f) graphiques de probabilité de survie pour les propriétés mécaniques des fils de jute pour la méthode LS [22].

### III.2.2 Propriétés de traction et de flexion de biocomposites

Les essais de traction ont été effectués jusqu'à la rupture des éprouvettes de biocomposites stratifiées par un fil de jute à une vitesse de 1 mm/min. Les dimensions des éprouvettes sont préparées selon la norme ASTM 3039-14 [7]. La longueur entre les mâchoires choisies pour ces essais est de 160 mm. Toutefois, les essais de pliage sont effectués à une vitesse de 1 mm/min et la longueur entre les soutènements est de 100 mm. Ces essais statiques de traction et de flexion sont effectués sur des éprouvettes de biocomposites ayant une fraction de volume de fibres ( $V_f$ ) de 40% dont le nombre est supérieur à 5. Le tableau III.2 présente les valeurs moyennes des propriétés mécaniques (résistance à la traction et module de traction), des essais de traction et (résistance à la flexion et module de flexion) pour essais de flexion sur biocomposites jute/époxy. L'analyse des résultats obtenus indique que la résistance moyenne est égale à 85,75 5,38 MPa et un module de Young est d'environ 4,19 0,26 GPa pour cinq échantillons testés en traction quasi-statique. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus dans les travaux de Jawaid et al. [10] avec une teneur en fibres de 40 %. Par contre, les propriétés mécaniques (résistance à la flexion et module de flexion) sont de l'ordre de 90.56, 5.78 MPa et 6.76, 0.76 GPa respectivement. Ces valeurs représentent une augmentation de l'ordre de 1.52%

pour la résistance à la flexion et de 32.54 % pour le module de flexion comparativement à celles de Jawaid et al. [10]. Selon le tableau 4, les résultats expérimentaux obtenus à partir des propriétés mécaniques des biocomposites jute/époxy sont proches de ceux de la littérature [8–12].

**Tableau III.2** Comparaison des propriétés de traction et de flexion des biocomposites de jute/polymère avec la littérature ouverte.

<i>Matrice</i>	<i>Longueur de fibre (mm)</i>	<i>Teneur en fibres (% w/w)</i>	<i>Résistance à la traction (MPa)</i>	<i>Module d'élasticité en traction (GPa)</i>	<i>Résistance à la flexion (MPa)</i>	<i>Module de flexion (GPa)</i>	<i>Références</i>
<b>Polyester</b>	Tissu	45	85 ± 3.30	0.8 ± 0.10	92.5 ± 5.79	5.1 ± 0.44	[8]
<b>Polyester</b>	Tissu	37	55.86	5.70	85.70	5.30	[9]
<b>Epoxy</b>	Tissu	40	53.31	4.20	89.20	5.10	[10]
<b>Polyester</b>	UD	30	139.68 ± 12.93	4.84 ± 0.14	-	-	[11]
<b>Polyester</b>	UD	/	38 ± 6	4.5 ± 0.6	80 ± 8	3.2 ± 0.2	[12]
<b>Epoxy</b>	Bidirectionnel	0–48	110	4.45	-	-	[13]
<b>MEDAPOXY (epoxy)</b>	Fabric	40	85.75 ± 5.38	4.19 ± 0.26	90.56 ± 5.78	6.76 ± 0.76	Ce travail

### III.3 Caractérisation physique de la fibre de jute

#### III.3.1 Résultats d'analyse MEB des fibres de jute

La **Figure III.4** montre les micrographies MEB des fils de jute non traités. Les micrographies MEB des fils de jute à la **Figure III.4** indiquent la présence d'une couche de cuticule cireuse amorphe sur la surface et de la structure des fibres emballées ensemble. La présence de substance cireuse/gommeuse a contribué à une mauvaise adhérence des fibres [14]. La **Figure III.4** montre les micrographies de la surface de la fibre de jute. Tous les micrographiques indiquent la substance gommeuse et cireuse et l'apparence d'une surface propre et lisse. On voit aussi qu'en raison de l'élimination partielle des substances cimentaires gommeuses, les fissures de la structure emballée et la fibrillation de la structure de la fibre a pris des lieux qui augmentent la surface de la fibre [15]. Des types d'observation similaires sont également rapportés par plusieurs chercheurs pour d'autres fibres telles que le sisal, le lin, etc. [16-18].

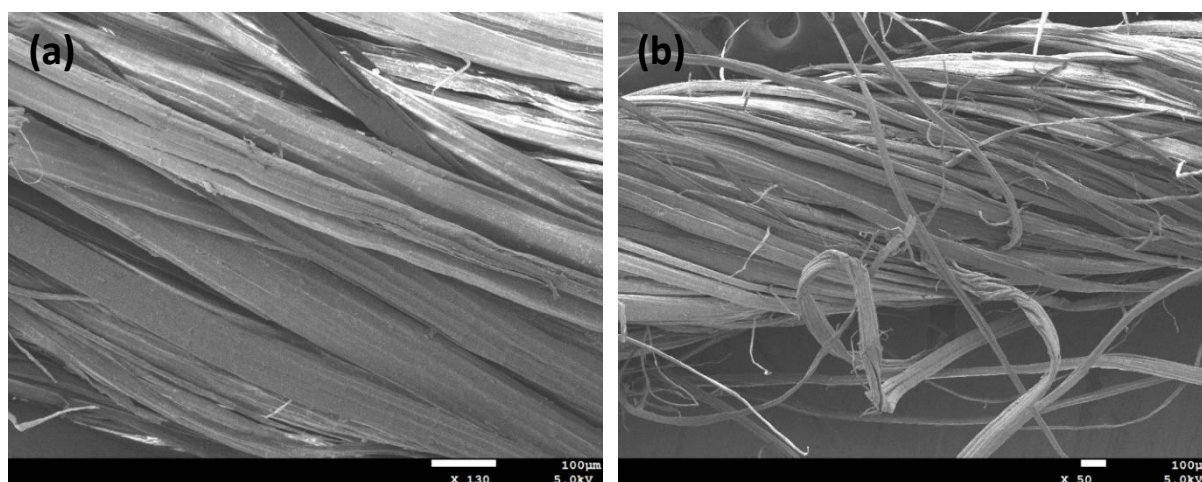


Figure III.4 : Micrographies MEB de fils de jute à (a) 130X, (b) 50 X.

### III.3.2 Résultats d'analyses spectroscopiques FTIR

Le graphique du spectre FTIR pour la fibre de jute cylindrique est présenté à la [Figure III.5](#). Comme l'ont souligné Khan et al. [19], les caractéristiques générales du spectre IR de la fibre naturelle sont principalement dues à la  $\alpha$ -cellulose, à l'hémicellulose et à la lignine, ils ont montré une réduction des spectres d'absorption en raison de la dissolution du composé covalent non polaire comme la cire, la graisse, etc. La structure chimique des fibres WF ainsi que les différentes formulations des biocomposites préparés peuvent être détectées par analyse FTIR. La [figure III.5](#) illustre le spectre FTIR des échantillons étudiés. Le spectre de la fibre de jute se compose d'une large bande d'absorption observée à  $3334\text{ cm}^{-1}$ , qui est attribuée à l'étirement du groupe OH de cellulose. Le tronçon de la liaison -CH de l'hémicellulose est représenté par deux pics observés dans la zone  $2914\text{-}1644\text{ cm}^{-1}$ . Le pic d'absorption à  $1510\text{ cm}^{-1}$  correspond aux vibrations d'étirement du groupe C = O ester carbonyle principalement dues au groupe hémicellulose. A  $1435\text{ cm}^{-1}$ , le pic d'étirement de la liaison C = C qui est attribué à la lignine est détecté alors que le pic observé à  $1314\text{ cm}^{-1}$  représente la courbure C-H de la cellulose. La vibration étirée C-O du groupe acétylique dans l'hémicellulose et la lignine, est observée à  $1030\text{ cm}^{-1}$ . Enfin, la déformation du C-OH est apparue à  $595\text{ cm}^{-1}$ .

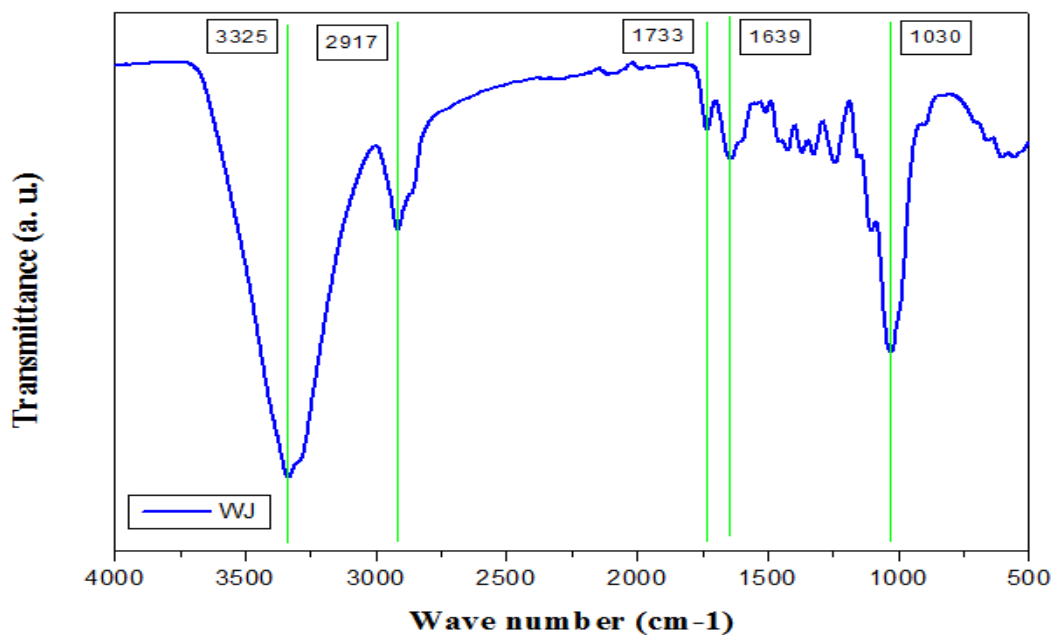


Figure III.5 Spectres FTIR pour le fibre de jute.

### III.3.3 Résultats d'analyses diffraction des rayons X (DRX)

La figure III.6 présente le diffractogramme de rayons X de jute cylindrique. Les parois cellulaires des fibres végétales se composent principalement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. La cellulose est composée de régions amorphes et cristallines, bien que la lignine et l'hémicellulose soient amorphes. Les échantillons fibre de jute analysés par XRD donnent des spectres similaires formés par deux pics principaux distincts à  $2\theta = 21.62^\circ$  et  $2\theta = 23.98^\circ$  qui sont attribués respectivement à la réflexion (110) et à la réflexion (200) ; ces deux pics sont liés au système cristallin orthorhombique.

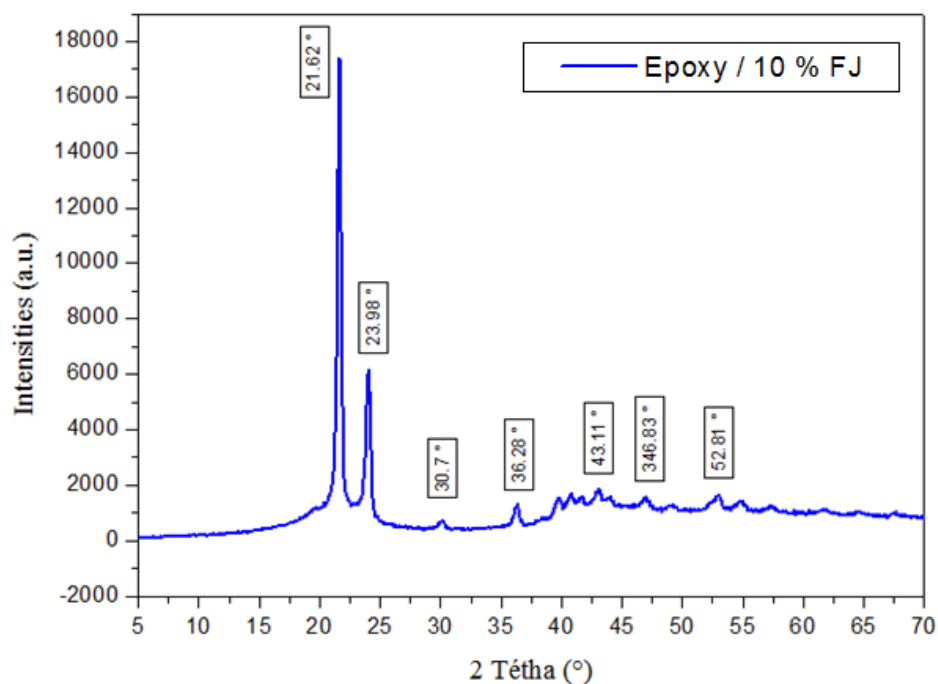


Figure III.6 le diffractogramme de rayons X du fibre de jute cylindrique.

### III.4 Caractérisation thermique de la fibre de jute

#### III.4.1 Résultats d'analyses thermogravimétrique (TGA)

La stabilité thermique du composite renforcé de fibres naturelles dépend des constituants chimiques (cellulose, hémicellulose et lignine) de la fibre. Les courbes ATG pour les différents composites (Epoxy/%FJ) sont présentées sur la Figure III.7. Comme on peut le voir sur la figure III.8, les composites époxy/% FJ présentent deux principales pertes de poids autour de 250-350 °C et 420-480 °C en raison de la dégradation des fibres de jute et de la matrice époxy, respectivement.

Il est présenté que les températures maximales de dégradation de la matrice époxy ont légèrement diminué avec l'ajout de fibres de jute. En outre, cette figure indique que l'ajout de FJ dans la matrice époxy réduit la stabilité thermique de l'époxy. Il y a une tendance apparente à la baisse de la stabilité thermique des biocomposites avec l'augmentation de la fraction pondérale de FJ.

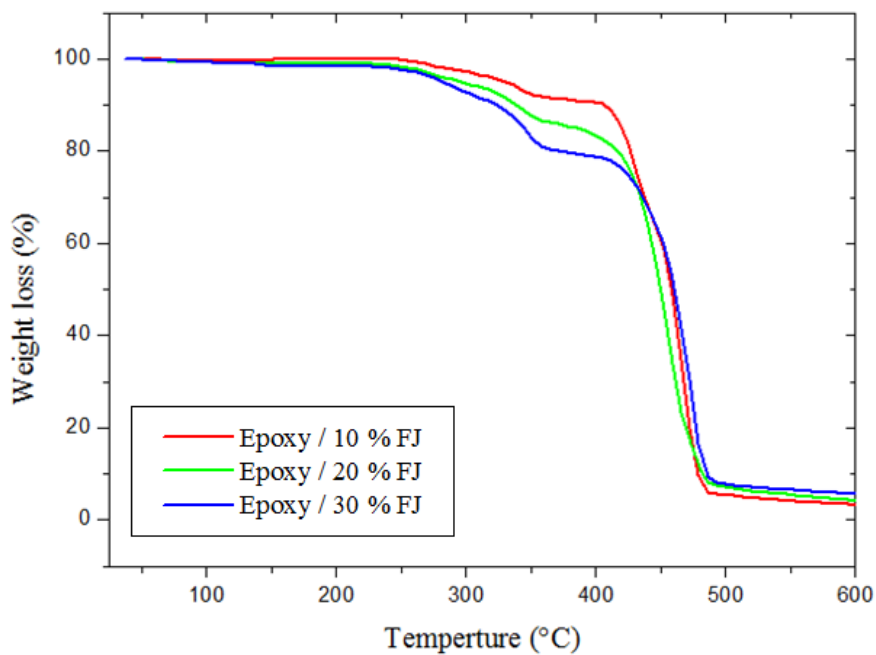


Figure III.7 Courbes thermogravimétriques des biocomposites (Epoxy/%FJ).

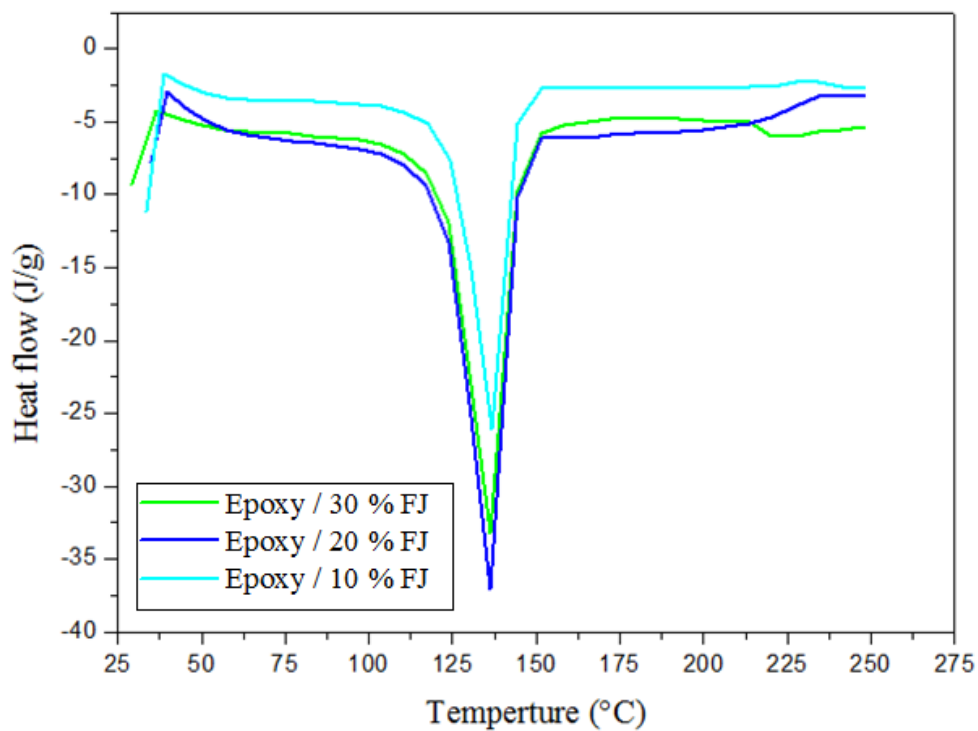


Figure III.8 DSC de biocomposite jute/époxy .

La température de fusion et l'enthalpie de fusion des différents biocomposites peuvent être déterminés à partir des courbes DSC. [La figure III.7](#) montre que la température de fusion et l'enthalpie de fusion ne changent pas considérablement après l'ajout de FJ.

### III.5 Conclusion

La présente recherche s'est concentrée sur les analyses thermo-physico-chimique des composites polymères à fibres de jute.

# Chapitre IV

COMPORTEMENT EN  
PERÇAGE D'UNE  
STRUCTURE  
BIOCOMPOSITE EN FIBRE  
DE JUTE/EPOXY :  
OPTIMISATION PAR RSM

# Chapitre V

COMPORTEMENT EN  
PERÇAGE D'UNE  
STRUCTURE  
BIOCOMPOSITE :  
OPTIMISATION PAR ANN

## Chapitre V.

### **COMPORTEMENT EN PERÇAGE D'UNE STRUCTURE BIOCOMPOSITE : OPTIMISATION PAR ANN**

Contenu du chapitre	Page
Résumé.....	111
V.1 Introduction .....	112
V.2 Réseaux de neurones artificiels (ANN).....	115
V.2.1 Calcul de la valeur prédite.....	116
V.2.2 Les neurones formels.....	117
V.2.3 Différentes fonctions de transfert .....	118
V.2.4 Perceptron simple.....	119
V.2.5 Perceptron multicouches.....	119
V.2.6 Algorithme de rétro-propagation .....	119
V.2.7 Apprentissage .....	119
V.3 Les avantages et limites des réseaux de neurones.....	120
V.4 Méthodes et techniques expérimentale.....	121
V.5 Résultats et discussions .....	121
V.5.1 Prédiction du facteur de délamination par le modèle ANN .....	121
V.5.2 Comparaison des modèles RSM et ANN .....	124
V.6 Conclusion.....	132

## Résumé

Le désir de développer un système artificiel capable d'accomplir des tâches intelligentes dans la modélisation et l'optimisation des procédés de mise en forme dans un temps court, est l'origine du développement d'un outil de modélisation et d'optimisation à base de réseaux neuronaux artificiels (ANN). Ce type d'analyse est très utile pour la réduction de la variabilité et le risque de défaillance en contrôlant en amont les paramètres influents. Nous présentons dans ce chapitre la démarche de développement que nous avons suivi pour coupler un programme à base de réseaux de neurones artificiels (ANN) à l'aide de la boîte à outils pour réseaux neuronaux de MATLAB. Pour construire un modèle neuronal, nous avons besoin d'un plan d'expériences. Nous avons donc utilisé une étude paramétrique mettant en relation les variables de sortie avec les variables d'entrée dans un processus bien déterminé pour le développement du modèle neuronal.

## V.1 Introduction

Au cours de la dernière décennie, les fibres naturelles sont largement utilisées pour renforcer les polymères. Il existe de nombreuses applications des composites de fibres naturelles dans la vie quotidienne. Cependant le principal inconvénient de la fibre naturelle est leur nature hydrophile. Ils ont également une faible stabilité environnementale et dimensionnelle qui empêchent une utilisation plus large des composites de fibres naturelles. La possibilité d'utiliser ces matériaux dans des applications extérieures rend nécessaire l'analyse de leur comportement mécanique sous l'influence de différentes conditions d'altération.

La conscience environnementale motive aujourd'hui les chercheurs, dans le monde entier sur les études de composite de polymère renforcé de fibres naturelles et l'option rentable de composites renforcés de fibres synthétiques. La disponibilité des fibres naturelles et la facilité de fabrication ont incité les chercheurs à essayer des fibres peu coûteuses disponibles localement et à étudier leur faisabilité de renforcement et dans quelle mesure elles satisfont aux spécifications requises d'un bon composite polymère renforcé pour différentes applications. Avec un faible coût et des propriétés mécaniques spécifiques élevées, la fibre naturelle représente une bonne alternative renouvelable et biodégradable au renforcement synthétique le plus commun, c.-à-d. fibre de verre. Malgré l'intérêt et l'attrait environnemental des fibres naturelles, l'utilisation est limitée aux applications non génératrices de dommages, en raison de leur résistance inférieure par rapport au composite de polymère renforcé de fibres synthétiques. Les défauts de rigidité et de résistance des biocomposites peuvent être surmontés par des configurations structurelles et une meilleure disposition dans le sens de placer les fibres dans des endroits spécifiques pour une performance de résistance la plus élevée. En conséquence, des études approfondies sur la préparation et les propriétés du composite de matrice de polymère (PMC) remplaçant la fibre synthétique avec des fibres naturelle.

En effet, il existe une grande variété de fibres cellulosiques qui sont actuellement utilisées comme renforts de polymères pour la fabrication de plusieurs pièces ou comme charges [1] telles que : sisal [2-4], Phoenix dactylifera [5] jute [4-6-8], Agave americana [9-10] flax [4-7-11-12], Rhextophyllum camerunense [13] et l'arche d'acacia nilotica L. [14]. Ces fibres végétales ont de nombreux avantages sur la fibre de verre ou la fibre de carbone comme renouvelable (écologique), respectueux de l'environnement, à faible coût, léger et haute performance mécanique spécifique. Les défauts de rigidité et de résistance des biocomposites peuvent être surmontés par des configurations structurelles et une meilleure disposition dans le sens de placer les fibres dans des endroits spécifiques pour une performance de résistance la plus élevée. En conséquence, des

études approfondies sur la préparation et les propriétés du composite de matrice de polymère (PMC) remplaçant la fibre synthétique avec des fibres naturelles comme le jute, le sisal, l'ananas, le bambou et le kenaf ont été effectuées. Ces fibres végétales ont de nombreux avantages sur la fibre de verre ou la fibre de carbone comme renouvelable, respectueux de l'environnement, à faible coût, léger et haute performance mécanique spécifique.

Aujourd'hui, de plusieurs travaux scientifiques sont disponibles au l'usinage talque le perçage des renforts composites en fibres synthétique on rappelle les fibres de carbone, d'aramide et de verre [15–23]. Les articles qui traitent l'étude du perçage des biocomposites malheureusement sont peu nombreux [8-16-32-41-24-42–46-25–31] . En fait, les travaux d'usinage sur les composites suivent généralement la même approche d'étude, qui consiste à considérer le processus d'usinage comme une boîte noire, exprimant les paramètres de sortie en fonction des paramètres d'entrée.

Chandramohan, Rajesh Rezghi Maleki et al. Bajpai et Singh [30] Bajpai et al. [33-60-61] Davim et Reis [63] Chaudhary et Gohil [35] Athijayamani et al. [55] Venkateshwaran et ElayaPerumal [36] Ismail et al [39], Abilash et Sivapragash [41] Athijayamani et al. [37] Lotfi et al. [14] ont constaté qu'en raison de la différence du mécanisme de coupe, le type de foret utilisé avait une grande influence sur la force de poussée et de ce fait sur la taille du délaminage et l'influence de la géométrie de l'outil est importante par rapport à d'autres paramètres L'études de ces dernier a montré qui porte sur les performances de forage telles que la force de poussée, le couple la géométrie des outils est le facteur important qui influence les forces et les dommages induits par le forage. De plus, leur ANOVA a montré que le choix du foret a un grand impact sur le facteur de délaminage (67,27 %) et la rugosité de surface (74,44 %). Cependant, il a été démontré que la géométrie des outils a moins d'impact sur la résistance à la traction résiduelle des composites FFRP [49]. L'analyse ANOVA a été adoptée pour voir quels paramètres de forage sont statistiquement significatifs. En effet, Les auteurs concluent que, les dommages les plus faibles avec une bonne qualité du trou du lin / PLA biocomposite est atteint avec le foret de torsion HSS, une vitesse de broche de 2550 rpm et un taux d'alimentation de 0,08 mm /tr. Un autre travail récent, Parthipan et al. [64], a mené une recherche intéressante axée sur l'effet de la performance de forage des particules d'oxyde de silicium (IV) traité au silane, despercées dans une matrice époxy renforcée de fibres de kenaf. Le comportement de forage de la biocomposite a montré que l'ajout d'oxyde de nanosilicium (IV) et de fibre kenaf traitée au silane maintient une stabilité dimensionnelle élevée, une pénétration de frottement plus faible, une zone affectée thermique plus faible et une usure plus faible de l'outil. Récemment, Belaadi et al. [8] ont développé une

recherche intéressante centrée sur l'effet des paramètres de forage tels que la vitesse de la broche, la vitesse d'avance et les diamètres de forage sur les biocomposites fibres courtes de jute / polyester afin d'estimer l'influence du facteur de délaminage  $F_d$ . Un autre travail récent de Belaadi et al. [50] ont développé un modèle de réseau de neurones artificiel (ANN) qui permet d'évaluer les effets directs et les effets d'interactions des paramètres de coupe afin d'analyser le délaminage. Dans leurs expériences, le perçage des plaques de tissu de jute à matrice epoxy a été effectué trois fois pour chaque condition de coupe, et les dommages en sortie de trou ont été mesurés à l'aide d'un scanner de haut résolution traitée ensuite par Image J afin de calculer le facteur de délaminage. Les résultats ont révélé que le délaminage est sensible à chaque paramètre de coupe et qu'une combinaison de vitesse de coupe élevée et de vitesse d'avance faible permet de le minimiser. Par ailleurs, l'analyse de régression a établi une très bonne correspondance entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales du facteur de délaminage. Ce modèle établit une relation non linéaire entre les paramètres de perçage et le facteur de délaminage.

En effet, la plupart des dommages induits par le foret lors du processus du perçage se situent dans la région interne ou externe du biocomposite ou l'évaluation de ce dernier est une tâche difficile. Afin de quantifier la taille, la forme et la région de la zone de délamination, il est essentiel d'utiliser une analyse microstructurale prise en charge par un logiciel de traitement d'image. La technique d'inspection visuelle crée des problèmes particuliers pour quantifier le délaminage des biocomposites. D'après la revue de la littérature, on peut affirmer que peu de travaux de recherche ont discuté le domaine du perçage des biocomposites à fibres naturelles. On d'autre terme, il existe encore un champ important de recherche dans le domaine d'usinage des biocomposites. Dans ce contexte, ce chapitre se focalise sur l'effet des paramètres d'usinage en perçage sur le facteur de délaminage ( $F_d$ ) des biocomposites en époxy renforcé de toile de jute tissée (WJF). A titre comparatif, les différentes expressions d'évaluation du facteur des dommages par délamination en perçage ont été utilisées. Un outil aux différents diamètres a été choisi tels que le foret à bois (Brad & Spur) afin d'estimer l'influence et l'interaction simultanée des paramètres d'entrées sur le facteur  $F_d$ . En effet, les réseaux de neurones artificiels (ANN) ainsi que la méthodologie RSM a été précédemment utilisé afin d'estimer l'influence et l'interaction des paramètres de coupe sur le délaminage de sortie en perçage pour les différentes méthodes d'évaluations du  $F_d$ . Enfin, les fonctions d'optimisation telle que : l'algorithme génétique (GA) et la fonction (fmincon) ont été utilisées pour confirmer la combinaison optimale des paramètres de coupe optimaux ( $f$ ,  $N$  et  $d$ ) dans les structures biosandwiches étudiées dans ce travail.

## V.2 Réseaux de neurones artificiels (ANN)

Au cours des deux dernières décennies, des applications ont émergé basées sur une technique appelée "réseaux de neurones artificiels". Ces applications couvrent de nombreux domaines tels que la reconnaissance de caractères, l'optimisation des tâches répétitives et même les prévisions financières. Le terme « réseaux de neurones artificiels » décrit une famille d'algorithmes inspirés à l'origine des réseaux de neurones humains, mais qui se sont ensuite éloignés des modèles cérébraux et se sont tournés vers des techniques statistiques. Réseaux de neurones. La [figure V.1](#) est un outil d'analyse statistique permettant de construire des modèles comportementaux à partir de données d'exemples comportementaux. Un réseau de neurones est constitué d'un graphe orienté pondéré dont les nœuds représentent les neurones. Ces neurones ont des fonctions d'activation qui leur permettent d'influencer d'autres neurones du réseau. Les connexions entre les neurones, appelées liens synaptiques, pilotent l'activité neuronale avec des poids de connexion caractéristiques. Les poids des connexions synaptiques sont appelés poids synaptiques. Les neurones peuvent être organisés de différentes manières. Il définit l'architecture et le modèle du réseau. L'architecture la plus courante est le perceptron dit multicouche. Avant de pouvoir utiliser le classificateur de réseau neuronal, nous devons le créer. Cela se passe en quatre étapes :

- 1 Construire une structure de réseau (principalement empirique).

- 2 Créez une base de données de vecteurs qui représentent le mieux la zone à modéliser. Il est divisé en deux parties.

Une partie servant à entraîner le réseau (appelée base d'apprentissage) et une autre partie à tester cet apprentissage (appelée base de test).

- 3 Configuration du réseau par apprentissage. Pendant l'apprentissage, le vecteur de données de base d'apprentissage est présenté au réseau plusieurs fois de suite. L'algorithme d'apprentissage ajuste les poids du réseau à fin que les vecteurs soient appris correctement. L'apprentissage s'arrête lorsque l'algorithme atteint un état stable.

- 4 Une phase de reconnaissance dans laquelle chaque vecteur de test est présenté au réseau. Les sorties correspondantes sont calculées en propageant les vecteurs à travers le réseau. Les réponses du réseau sont lues directement à partir des unités de sortie et comparées aux réponses attendues. Une fois que les performances du réseau sont acceptables, il peut être utilisé pour répondre aux besoins qui ont conduit à sa construction.

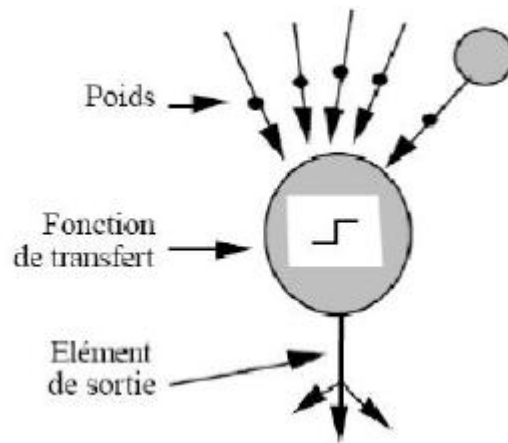


Figure V.1 Réseau de neurones artificiels.

### V.2.1 Calcul de la valeur prédite

Le calcul des valeurs prédites par un réseau de neurones consiste en quelques étapes simples. Tout d'abord, calculez un ensemble de combinaisons linéaires des variables explicatives :

$$v_i = \alpha_{i,0} + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}x_j \quad (\text{V.1})$$

Où  $x_j$  est la  $j$  ième des  $n$  variables explicatives et  $\alpha_i, 0$  et  $\alpha_i, j$  sont les coefficients de la première combinaison linéaire. Le résultat de la combinaison linéaire  $v_i$  représente une projection unidirectionnelle de l'espace des variables explicatives. Chacune de ces prédictions peut combiner des informations provenant de plusieurs variables. La deuxième étape consiste à appliquer une transformation non linéaire à chacune des combinaisons linéaires pour obtenir les valeurs des unités dites cachées ou neurones qui forment la couche cachée. Les tangentes hyperboliques sont couramment utilisées pour effectuer des transformations non linéaires.

$$h_i = \tanh(v_i) = \frac{e^{v_i} - e^{-v_i}}{e^{v_i} + e^{-v_i}} \quad (\text{V.2})$$

Où  $h_i$  est la 1<sup>ère</sup> unité cachée. L'utilisation d'une telle fonction de transfert avec une expansion infinie dans ses termes joue un rôle fondamental dans la capacité d'un réseau de neurones de capter les dépendances de haut niveau entre les variables explicatives. Finalement, les unités cachées sont recombinaées linéairement afin de calculer la valeur prédite par le réseau de neurones :

$$P\left(\begin{matrix} \rightarrow \\ x \end{matrix}\right) = \beta_0 \sum_{i=1}^{n_h} \beta_i h_i \quad (\text{V.3})$$

Où  $P\left(\vec{x}\right)$  est la valeur prédite par le réseau de neurones,  $n_h$  est le nombre d'unités cachées du réseau et  $\beta_0$  et  $\beta_i$  sont les coefficients de la combinaison linéaire. Les  $n$  variables explicatives sont représentées sous forme vectorielle par  $\vec{x}$ . On peut résumer les étapes du calcul en une seule équation :

$$P\left(\vec{x}\right) = \beta_0 \sum_{i=1}^{n_h} \beta_i \tanh\left(\alpha_{i,0} + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_j\right) \quad (V.4)$$

Par conséquent, une visualisation de la structure du réseau neuronal est présentée à la figure V.2.

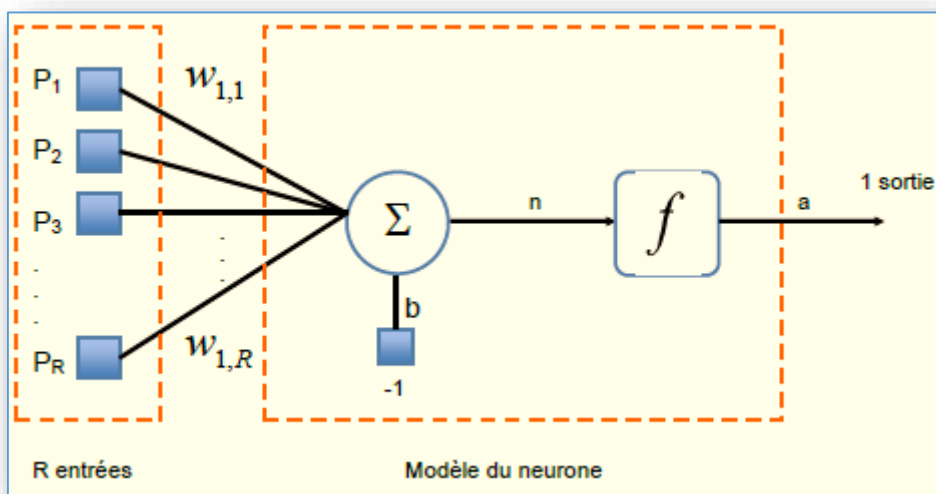


Figure V.2 Topologie d'un réseau de neurones.

### V.2.2 Les neurones formels

Un "neurone formel" (ou simplement "neurone") est une fonction algébrique bornée non linéaire dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids. Les variables de cette fonction sont communément appelées les "entrées" du neurone, et les valeurs de la fonction sont appelées ses "sorties" [78]. Les neurones sont donc avant tout des opérateurs mathématiques capables de calculer des nombres en quelques lignes de logiciels. Il est devenu courant de représenter graphiquement les neurones, comme le montre la figure V.3.

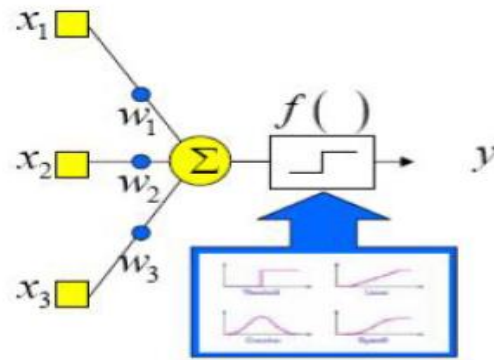


Figure V.3 Représentation d'un neurone formel [78].

### V.2.3 Différentes fonctions de transfert

Différents types de neurones se distinguent ainsi par le type  $f$  de leur fonction de transfert (Fig.II.23). Les types principaux sont :

- seuil  $f(x) = 1_{[0, +\infty[}(x)$ ,
- linéaire  $f$  est la fonction identité,
- sigmoïde  $f(x) = 1/(1 + e^x)$ ,
- tangente hyperbolique (sigmoïde)  $f(x) = (2 / (1 + e^{-2x})) - 1$ ,
- stochastiques  $f(x) = 1$  avec la probabilité  $1/(1 + e^{-x/H})$ , 0 sinon ( $H$  intervient comme une température dans un algorithme de recuit simulé),

Les modèles linéaires et sigmoïdaux sont bien adaptés aux algorithmes d'apprentissage en arrière-plan car leurs fonctions d'activation sont différentiables. Ce sont les plus couramment utilisés [79].

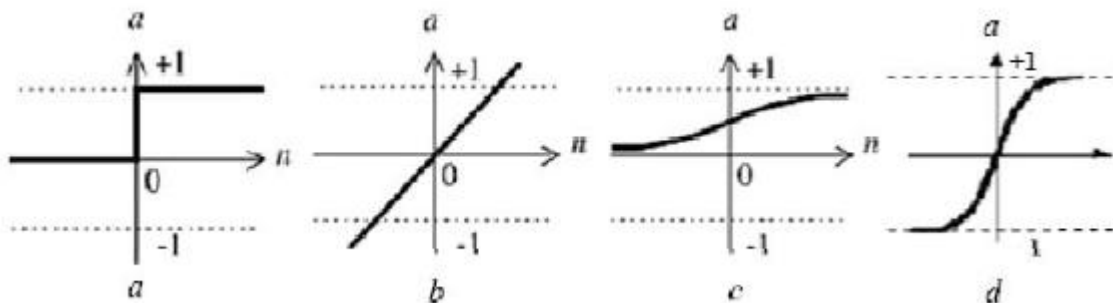


Figure V.4 Différentes fonction de transfert de réseau de neurones [79].

### V.2.4 Perceptron simple

Un perceptron simple est le plus simple des réseaux existants car il est constitué d'un seul neurone. De tels réseaux peuvent être utilisés, par exemple, pour des tâches de classification de caractères uniques. Pour classer les 26 lettres de l'alphabet, il faut combiner 26 perceptrons simples. Nous n'utilisons pas l'index du neurone de sortie car nous ne considérons qu'un neurone à la fois [80].

### V.2.5 Perceptron multicouches

Les perceptrons multicouches sont organisés en couches de neurones. Les couches entre les nœuds d'entrée et de sortie sont appelées "couches cachées". Les perceptrons multicouches sont plus flexibles que les perceptrons simples et peuvent résoudre des problèmes qui ne sont pas linéairement séparables. La règle d'apprentissage la plus importante de ces réseaux est l'algorithme de rétropropagation [80].

### V.2.6 Algorithme de rétro-propagation

L'algorithme de rétropropagation est une descente de gradient appliquée aux perceptrons multicouches. Le but reste le même minimiser la fonction d'erreur [80].

### V.2.7 Apprentissage

Une fois que les poids et les biais du réseau ont été initialisés de manière aléatoire, le réseau est prêt pour l'entraînement. Ce processus nécessite un ensemble de données adaptées au réseau : une entrée P et une sortie cible C. Pendant l'apprentissage, les pondérations et biais du réseau sont ajustés de manière itérative pour minimiser la fonction puissance (figure V.5). En général, la fonction puissance utilisée dans la formation des modèles de réseaux neuronaux est l'erreur quadratique moyenne entre la valeur cible et la valeur obtenue à partir du réseau.

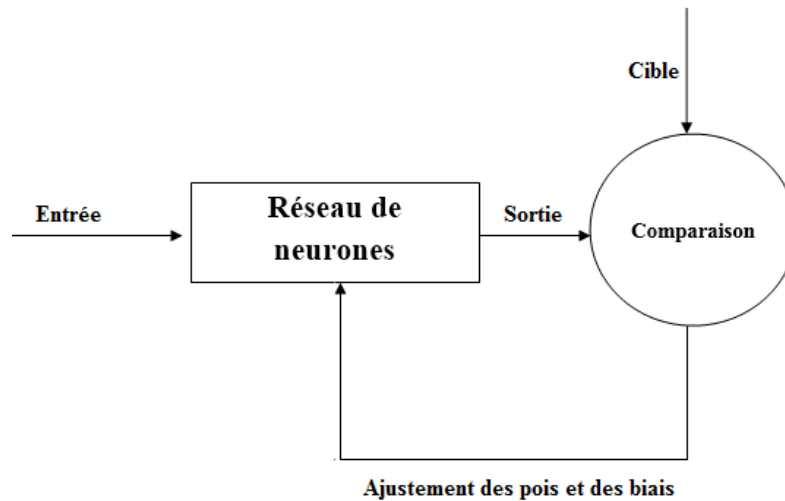


Figure V.5 Processus d'apprentissage du réseau de neurones.

### V.3 Les avantages et limites des réseaux de neurones

Avantages	Les limites des réseaux de neurones
<p>Un des intérêts majeurs des réseaux de neurones artificiels est qu'ils sont organisés sous la forme d'une structure massivement parallèle, on peut citer aussi les avantages suivants (similaires à ceux des réseaux de neurones biologiques) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Les neurones sont des composants non linéaires, ceci est une propriété très importante car cela leur permet de traiter des problèmes physiques non linéaires ;</li> <li>✓ Ils sont capables d'apprendre et de généraliser après une période d'apprentissage qui consiste à leur présenter des entrées ainsi que les sorties que l'on voudrait qu'ils trouvent, ils sont capables de produire des sorties "raisonnables" sur des cas qu'ils n'ont pas appris ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Les réseaux de neurones artificiels ont besoin de cas réels servant d'exemples pour leur apprentissage. Par exemple, on peut utiliser un réseau de neurones pour reconnaître l'écriture d'une personne en lui fournissant plusieurs exemples d'écriture de cette personne mais, cela nécessite une masse importante de textes comme base d'apprentissage, ce qui n'est toujours pas faisable.</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ S'il a appris à travailler dans un environnement précis, on peut réapprendre un réseau pour qu'il s'adapte à un autre environnement semblable ;</li> <li>✓ Dans le cas d'un problème de classification un réseau de neurones il ne se contente pas de faire un choix : il fournit aussi un niveau de confiance sur sa décision. Cela permet de rejeter des motifs ambigus et d'avoir une idée sur la précision du résultat.</li> </ul>	
---	--

#### V.4 Méthodes et techniques expérimentale

Dans cette partie du chapitre on a décrite en détail toute les informations dans le chapitre précédant (Chapitre II).

#### V.5 Résultats et discussions

##### V.5.1 Prédiction du facteur de délamination par le modèle ANN

La couche d'entrée intègre les données dans le modèle de réseau et la couche de sortie fournit la réponse. Pour la prédiction du facteur de délamination, il a été utilisé un perceptron multicouche composé d'une couche d'entrée, d'une couche cachée et d'une couche de sortie. La conception du réseau ANN a été conçue à l'aide de Matlab Neural Network Toolbox. La conception du réseau ANN a été conçue à l'aide de Matlab Neural Network Toolbox. Le recours à la modélisation par les réseaux neuronaux offre une solution puissante, capable de simuler le comportement de tous les systèmes non linéaires[51]. Pour les modèles  $Fd_1$ ,  $Fd_2$  et  $Fd_3$ , la couche d'entrée comporte trois neurones, les couches cachées contiennent respectivement dix, onze et onze neurones, et la couche de sortie un neurone figure V.6. Le choix du nombre de neurones dans les couches cachées se base sur le principe de la réduction de l'erreur avec l'augmentation du nombre de nœuds caches [52]. Tableau V.1 présente les architectures ANN et les valeurs  $MSE$  et  $R$  pour la formation, la validation et le test de  $Fd_1$ ,  $Fd_2$  et  $Fd_3$ . En effet, ces neurones sont reliés entre eux par des poids Les Figures V.7 (a-i) correspondent aux prédictions du délaminage  $Fd$  par le biais du réseau

neuronal par rapport aux résultats des essais expérimentaux pour  $Fd_1$ ,  $Fd_2$  et  $Fd_3$  pour les groupes de données d'apprentissage, de test et de validation. On constate que la prédiction ANN est parfaitement en adéquation avec les résultats expérimentaux. Ainsi, selon les résultats obtenus, la capacité des modèles ANN développés pour  $Fd_1$ ,  $Fd_2$  et  $Fd_3$  permet de bien interpréter les données et constitue un bon moyen de prédire le facteur de délamination. Par ailleurs, les résultats indiquent que le modèle est un moyen efficace et applicable pour mesurer le facteur de délamination des composites fabriqués à partir de tissu de jute/polyester.

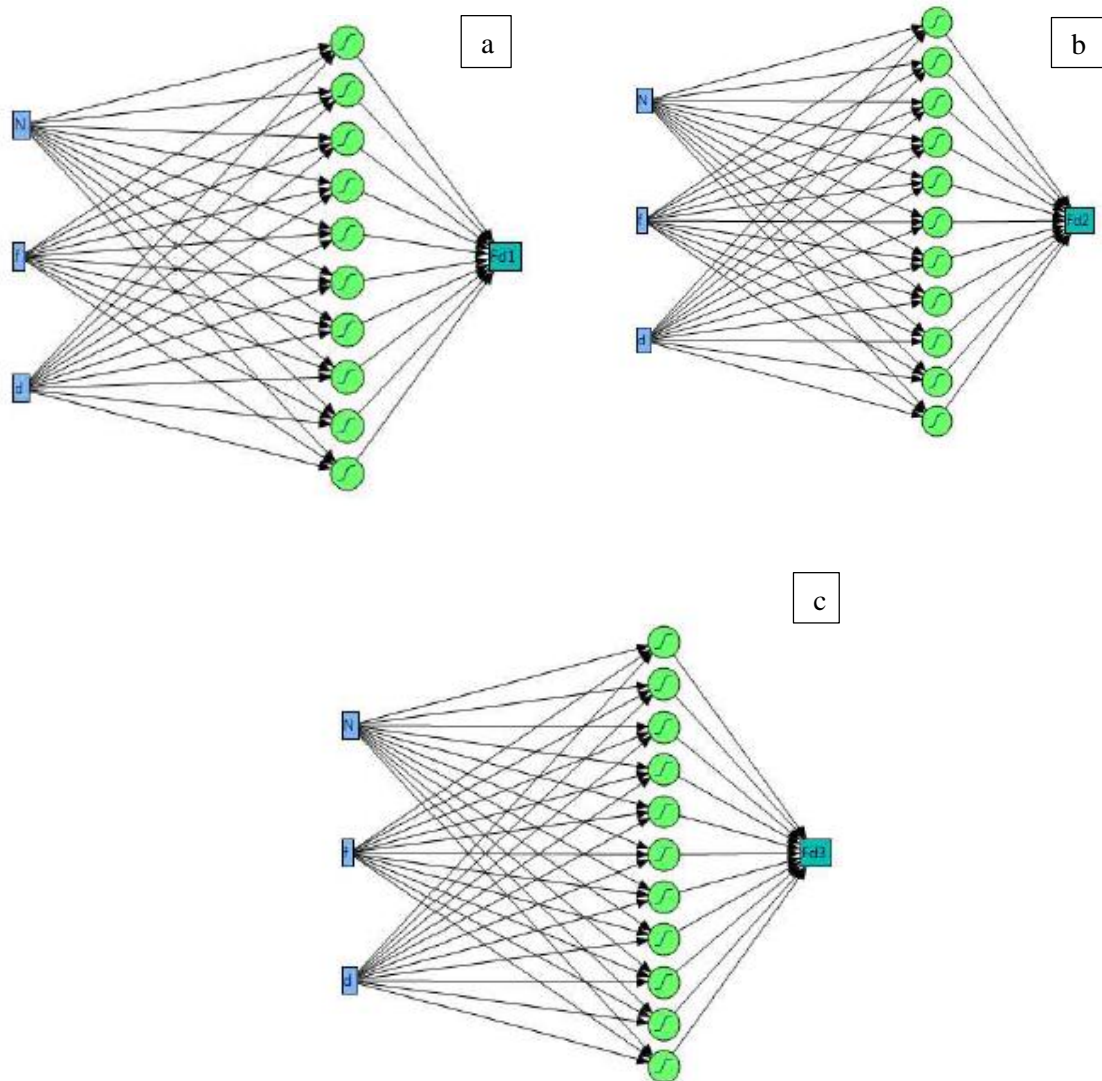


Figure V.6 Architecture ANN utilisée pour (a)  $Fd_1$ , (b)  $Fd_2$  et (b)  $Fd_3$ .

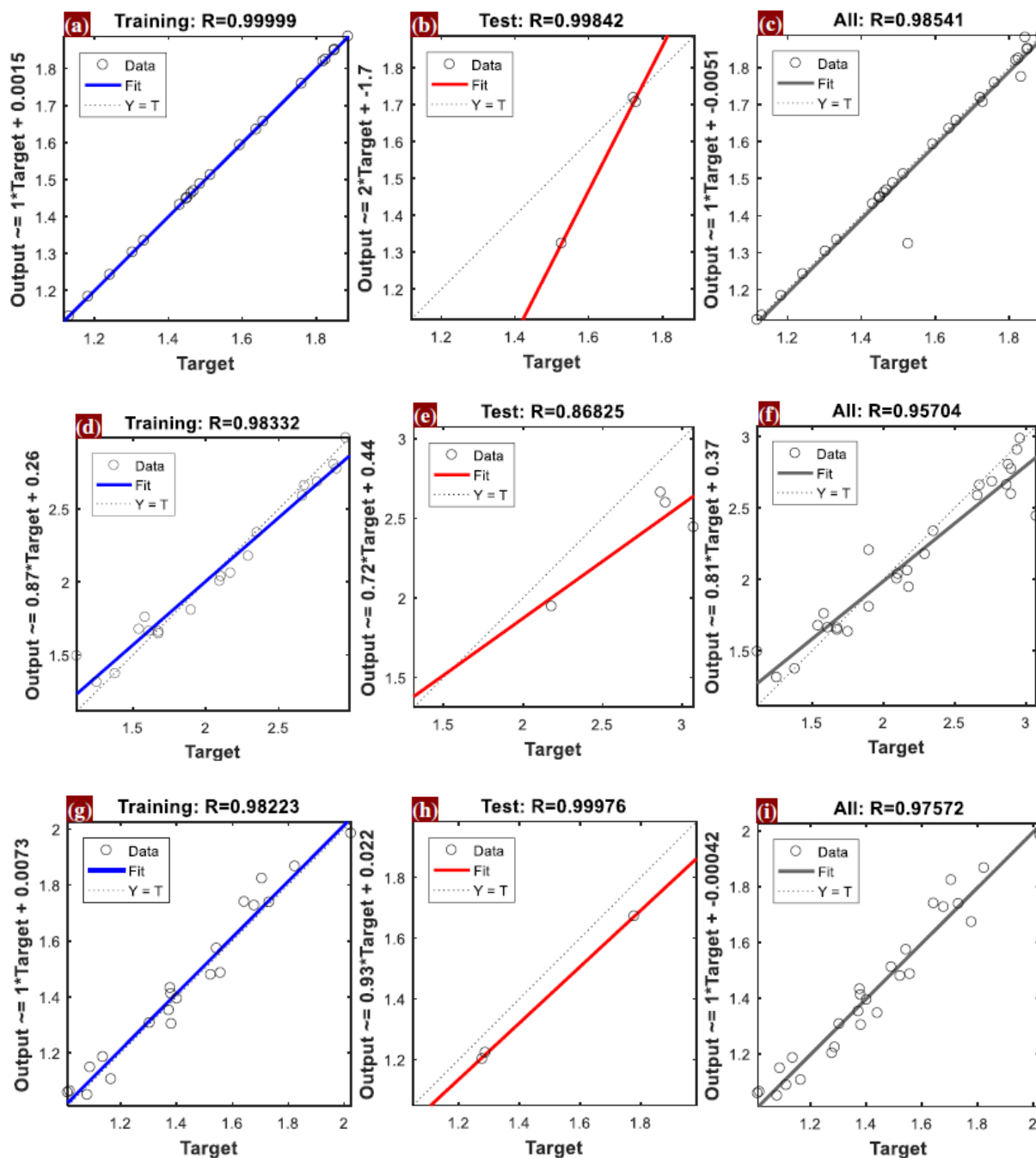


Figure V.7 Schéma de validation de régression des données (a-c) Fd1, (d-f) Fd2 et (g-i) Fd3.

**Tableau V.1** Essai ANN d'architectures MSE et valeur de R pour la formation, la validation et les essais de Fd1, Fd2 et Fd3.

Modèle	Réseau	Structure	Pourcentage	Échantillons	RMSE	Valeur de R
Fd1	3_10_1	Entraînement	80	21	4.47413E-4	9.96034E-1
		Validation	10	3	5.73370E-3	9.00364E-1
		Essai	10	3	5.26047E-3	9.62397E-1
Fd2	3_11_1	Entraînement	75	20	1.39890E-2	9.83323E-1
		Validation	10	3	3.58284E-2	9.39395E-1
		Essai	15	4	1.46822E-1	8.68254E-1
Fd3	3_11_1	Entraînement	75	21	2.92196E-3	9.82227E-1
		Validation	10	3	3.42195E-3	9.62655E-1
		Essai	15	3	7.23046E-3	9.99763E-1

### V.5.2 Comparaison des modèles RSM et ANN

La figure V.8 et le tableau V.2 présentent une comparaison des résultats prédits par les modèles ANN et RSM avec ceux obtenus expérimentalement. Il en ressort que les deux modèles fournissent une description satisfaisante des résultats obtenus expérimentalement. La figure V.9 montre la comparaison entre les tracés de surface 3D du facteur de délamination en fonction de  $f$ ,  $N$  et  $d$  du composite obtenu avec les modèles RSM et ANN. Il en ressort que les deux modèles fournissent une description satisfaisante des résultats obtenus expérimentalement. Selon les indications de la figure V.10, Le pourcentage d'erreur absolu maximal dans la prédiction par le modèle ANN des facteurs de délaminage  $Fd_1$ ,  $Fd_2$  et  $Fd_3$  est respectivement de 6,99%, 8,71% et 4,89%, alors que dans le modèle RSM, ce pourcentage est de 7,58%, 9,36% et 7,14%. Par conséquent, nous pouvons conclure que le modèle ANN offre une prédiction plus précise que le modèle RSM. Comme ces taux d'erreur sont faibles, on peut dire que le procédé d'optimisation est approprié et le modèle permet de prédire les réponses avec beaucoup de précision.

Les résultats prédits par le modèle ANN sont comparés à ceux obtenus par des tests expérimentaux dans le tableau 5 pour 3 ensembles de contrôle et dans le tableau 6 pour 24 ensembles d'entraînement d'apprentissage. Les tableaux 5 et 6 montrent que la prédiction ANN est en bon accord avec les résultats expérimentaux.

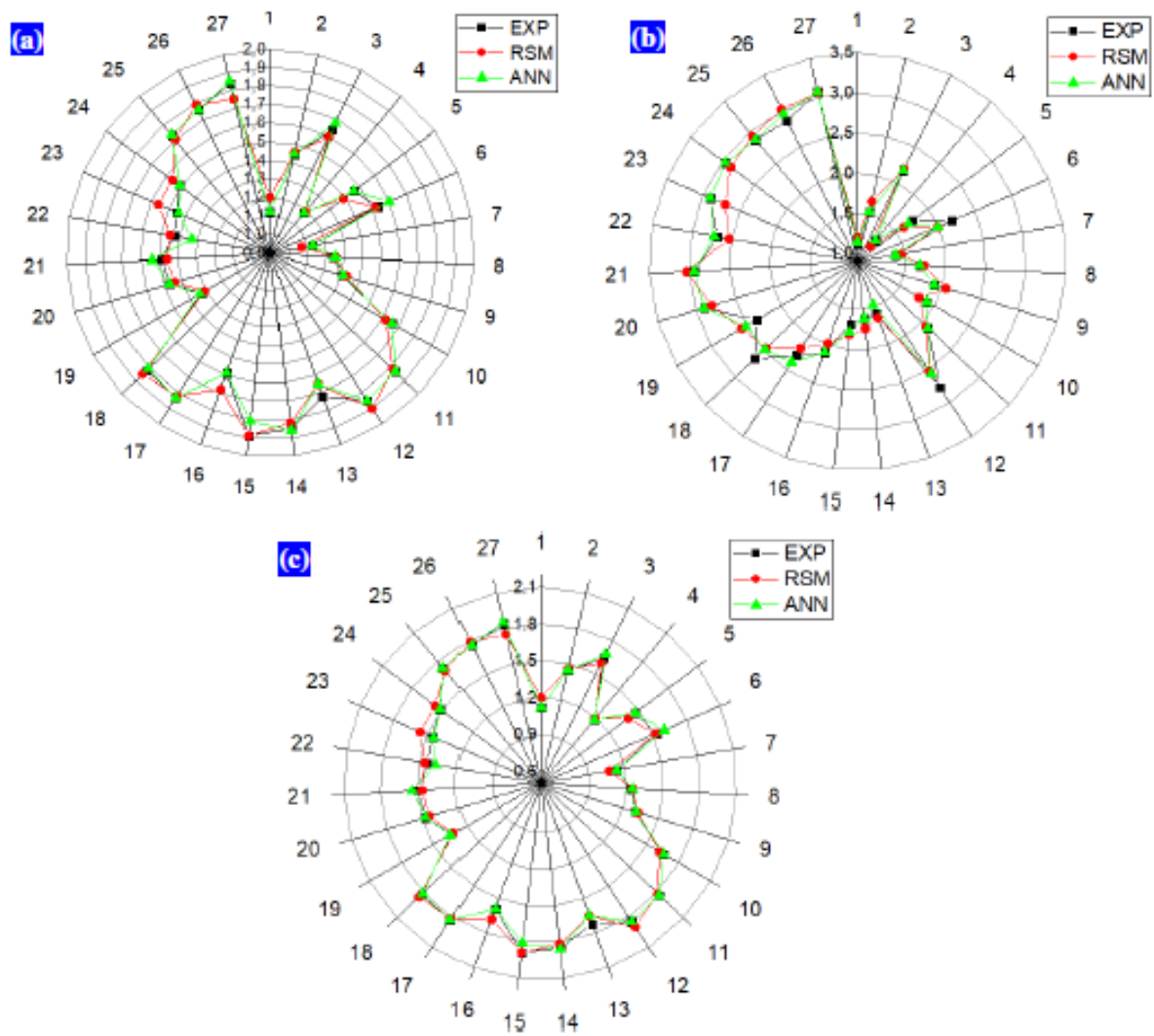


Figure V.8 Comparaison entre la Fd expérimentale et la Fd prévue avec les modèles RSM et ANN (a) données Fd1, (b) données Fd2 et (b) données Fd3.

**Tbleau V.2** Modèles mathématiques pour différents facteurs de délamination Fd pour le forage de tissu de jute / polyester biocomposite obtenu avec la méthode ANN.

<b>Fd<sub>1</sub></b>	$-1.6398 \times H_1 + 0.1493 \times H_2 - 1.2052 \times H_3 - 0.7614 \times H_4 - 0.3814 \times H_5 + 1.2643 \times H_6 + 1.4256 \times H_7$ $+ 0.4444 \times H_8 - 0.0256 \times H_9 - 0.4312 \times H_{10} + 0.9798$
	$\left\{ \begin{array}{l} H_1 = \tanh(0.5 \times (0.0032 \times N - 0.0001 \times f + 0.6634 \times d - 4.4658)) \\ H_2 = \tanh(0.5 \times (-0.0158 \times N - 0.0014 \times f - 0.5497 \times d + 7.6695)) \\ H_3 = \tanh(0.5 \times (-0.0071 \times N + 0.0008 \times f - 0.4698 \times d + 3.2338)) \\ H_4 = \tanh(0.5 \times (-0.0051 \times N - 0.0023 \times f - 0.3416 \times d + 7.7537)) \\ H_5 = \tanh(0.5 \times (-0.0167 \times N + 0.0002 \times f + 0.2674 \times d - 1.3141)) \\ H_6 = \tanh(0.5 \times (-0.0080 \times N - 0.0016 \times f - 0.0799 \times d + 4.7291)) \\ H_7 = \tanh(0.5 \times (0.0066 \times N - 0.0004 \times f + 1.0907 \times d - 7.1045)) \\ H_8 = \tanh(0.5 \times (-0.0006 \times N + 0.0052 \times f - 0.2445 \times d - 2.6163)) \\ H_9 = \tanh(0.5 \times (-0.0174 \times N - 0.0039 \times f + 0.4714 \times d + 2.2667)) \\ H_{10} = \tanh(0.5 \times (0.02066 \times N - 0.0019 \times f + 1.3044 \times d - 10.5202)) \end{array} \right.$
<b>Fd<sub>2</sub></b>	$0.1856 \times H_1 - 1.3672 \times H_2 + 0.3959 \times H_3 + 3.4304 \times H_4 + 1.4228 \times H_5 - 0.1183 \times H_6 - 1.5498 \times H_7$ $+ 0.5441 \times H_8 + 1.8424 \times H_9 - 3.3793 \times H_{10} - 0.0453 \times H_{11} + 1.8329$
	$\left\{ \begin{array}{l} H_1 = \tanh(.5 \times (0.0168 \times N + 0.0013 \times f + 1.0404 \times d - 10.0074)) \\ H_2 = \tanh(.5 \times (-0.0015 \times N - 0.0030 \times f + 0.8445 \times d - 1.8146)) \\ H_3 = \tanh(.5 \times (-0.0219 \times N + 0.0020 \times f + 0.5208 \times d - 2.3531)) \\ H_4 = \tanh(.5 \times (0.0060 \times N + 0.0010 \times f + 0.3422 \times d - 2.0797)) \\ H_5 = \tanh(.5 \times (-0.0025 \times N - 0.0047 \times f - 0.7390 \times d + 7.4919)) \\ H_6 = \tanh(.5 \times (0.0334 \times N - 0.0021 \times f + 0.8752 \times d - 8.1817)) \\ H_7 = \tanh(.5 \times (-0.0025 \times N + 0.0010 \times f - 0.2736 \times d + 1.5680)) \\ H_8 = \tanh(.5 \times (0.0025 \times N + 0.0019 \times f - 0.4599 \times d + 2.1186)) \\ H_9 = \tanh(.5 \times (-0.0028 \times N - 0.0023 \times f + 0.2517 \times d + 0.8347)) \\ H_{10} = \tanh(.5 \times (-0.0007 \times N - 0.0009 \times f - 0.0955 \times d + 2.3405)) \\ H_{11} = \tanh(.5 \times (-0.0298 \times N + 0.0005 \times f - 0.2519 \times d + 6.3235)) \end{array} \right.$
<b>Fd<sub>3</sub></b>	$-0.0294 \times H_1 + 0.4314 \times H_2 - 0.3314 \times H_3 + 0.2097 \times H_4 - 1.1851 \times H_5 - 0.3202 \times H_6 + 0.6172 \times H_7$ $- 0.8388 \times H_8 + 1.2221 \times H_9 + 0.1085 \times H_{10} + 0.3920 \times H_{11} + 2.5024$
	$\left\{ \begin{array}{l} H_1 = \tanh(.5 \times (0.0009 \times N - 0.00004 \times f - 0.0116 \times d + 0.0701)) \\ H_2 = \tanh(.5 \times (-0.0006 \times N + 0.00008 \times f + 0.0171 \times d - 0.3091)) \\ H_3 = \tanh(.5 \times (-0.0007 \times N + 0.00001 \times f - 0.0234 \times d + 0.4472)) \\ H_4 = \tanh(.5 \times (0.0009 \times N - 0.00006 \times f + 0.0095 \times d - 0.3226)) \\ H_5 = \tanh(.5 \times (-0.0010 \times N - 0.00011 \times f - 0.0589 \times d + 1.1869)) \\ H_6 = \tanh(.5 \times (-0.0022 \times N + 0.00024 \times f - 0.0029 \times d + 0.2842)) \\ H_7 = \tanh(.5 \times (0.0004 \times N - 0.00003 \times f + 0.0219 \times d - 0.4857)) \\ H_8 = \tanh(.5 \times (-0.0001 \times N - 0.00002 \times f - 0.0446 \times d + 0.8271)) \\ H_9 = \tanh(.5 \times (0.0011 \times N + 0.00007 \times f + 0.0582 \times d - 1.1684)) \\ H_{10} = \tanh(.5 \times (0.0001 \times N - 0.00006 \times f - 0.0010 \times d - 0.0102)) \\ H_{11} = \tanh(.5 \times (0.0009 \times N - 0.00005 \times f + 0.0146 \times d - 0.3994)) \end{array} \right.$

Tableau V.3 Comparaison entre l'approche RSM et ANN pour différents Fd.

Order	<i>Fd<sub>1</sub></i>			<i>Fd<sub>2</sub></i>			<i>Fd<sub>3</sub></i>		
	EXP	RSM	ANN	EXP	RSM	ANN	EXP	RSM	ANN
1	1.12	1.24	1.12	1.12	1.25	1.15	1.02	1.05	1.09
2	1.45	1.46	1.45	1.54	1.67	1.54	1.14	1.17	1.21
3	1.64	1.60	1.68	2.17	2.19	2.17	1.44	1.37	1.39
4	1.18	1.19	1.18	1.25	1.15	1.25	1.08	1.04	1.01
5	1.46	1.39	1.46	1.75	1.52	1.51	1.17	1.16	1.12
6	1.53	1.52	1.66	2.18	1.97	1.86	1.38	1.38	1.35
7	1.13	1.07	1.13	1.38	1.45	1.38	1.01	1.01	1.08
8	1.24	1.25	1.25	1.68	1.73	1.68	1.09	1.15	1.17
9	1.30	1.33	1.31	1.90	2.05	1.90	1.38	1.38	1.35
10	1.66	1.62	1.66	1.90	1.72	1.90	1.28	1.20	1.22
11	1.83	1.81	1.83	2.11	2.07	2.11	1.37	1.31	1.32
12	1.85	1.90	1.85	2.77	2.47	2.47	1.40	1.51	1.51
13	1.72	1.65	1.65	1.59	1.64	1.41	1.11	1.22	1.18
14	1.85	1.82	1.86	1.61	1.94	1.61	1.30	1.35	1.32
15	1.89	1.89	1.81	1.68	2.28	1.78	1.56	1.56	1.53
16	1.59	1.68	1.59	2.10	1.99	2.10	1.29	1.27	1.31
17	1.83	1.82	1.83	2.29	2.19	2.40	1.49	1.40	1.44
18	1.82	1.85	1.81	2.66	2.40	2.49	1.64	1.63	1.64
19	1.33	1.31	1.34	2.35	2.57	2.71	1.38	1.43	1.49
20	1.47	1.44	1.47	2.90	2.80	2.90	1.52	1.55	1.61
21	1.49	1.46	1.54	2.94	3.04	2.94	1.78	1.74	1.77
22	1.43	1.45	1.33	2.68	2.53	2.72	1.54	1.52	1.58
23	1.45	1.56	1.44	2.90	2.70	2.90	1.73	1.64	1.73
24	1.51	1.56	1.51	2.96	2.88	2.96	1.82	1.84	1.90
25	1.73	1.70	1.73	2.88	2.94	2.88	1.68	1.66	1.60
26	1.76	1.79	1.76	2.87	3.02	2.96	1.71	1.80	1.75
27	1.84	1.75	1.85	3.07	3.06	3.07	2.02	2.02	1.97

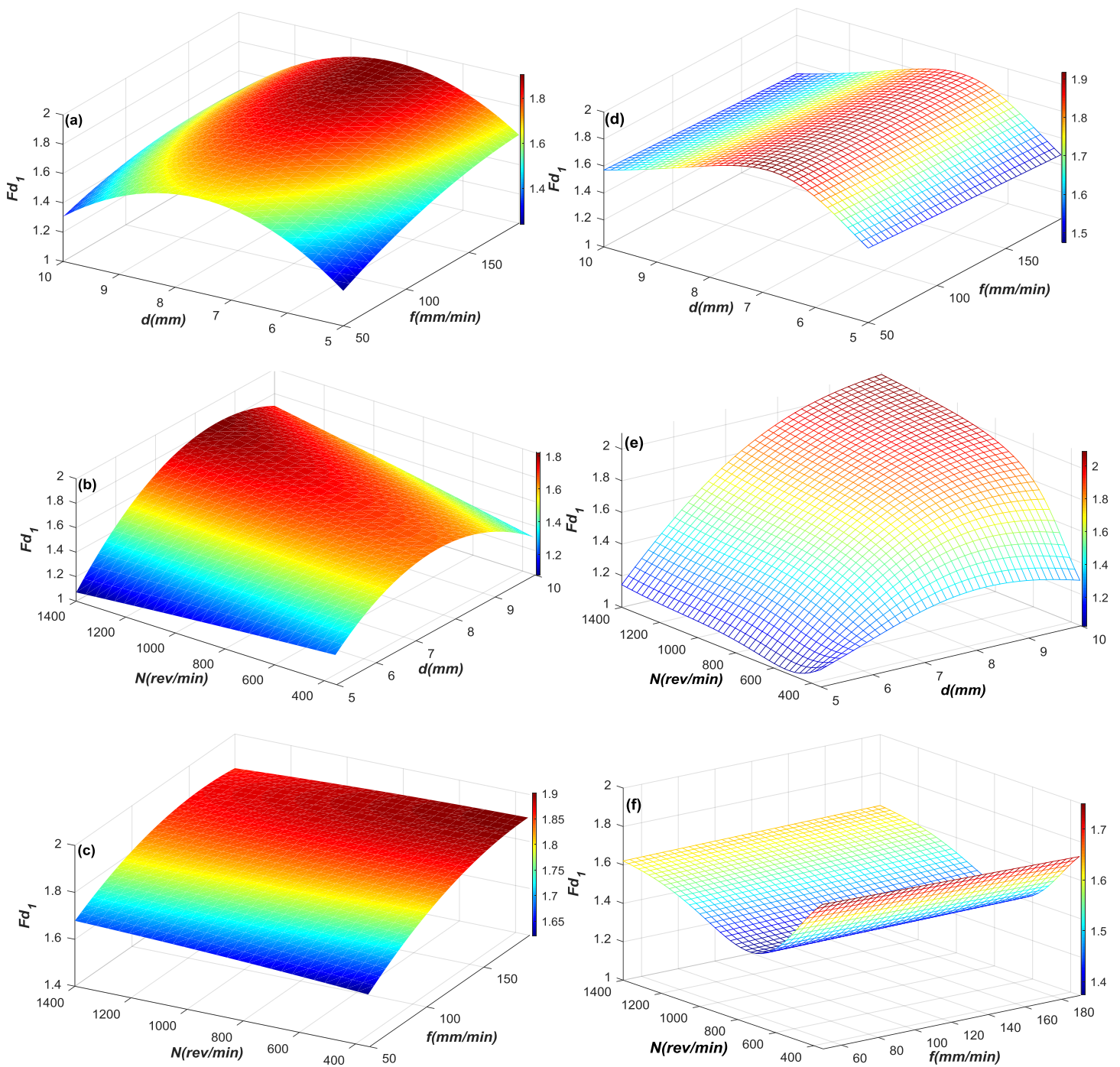


Figure V.9 Comparaison entre les tracés de surface 3D du facteur de délaminage pour  $Fd_1$  par rapport à  $f$ ,  $N$  et  $d$  des biocomposites élaborés (a-c) RSM et (d-f) ANN modèles.

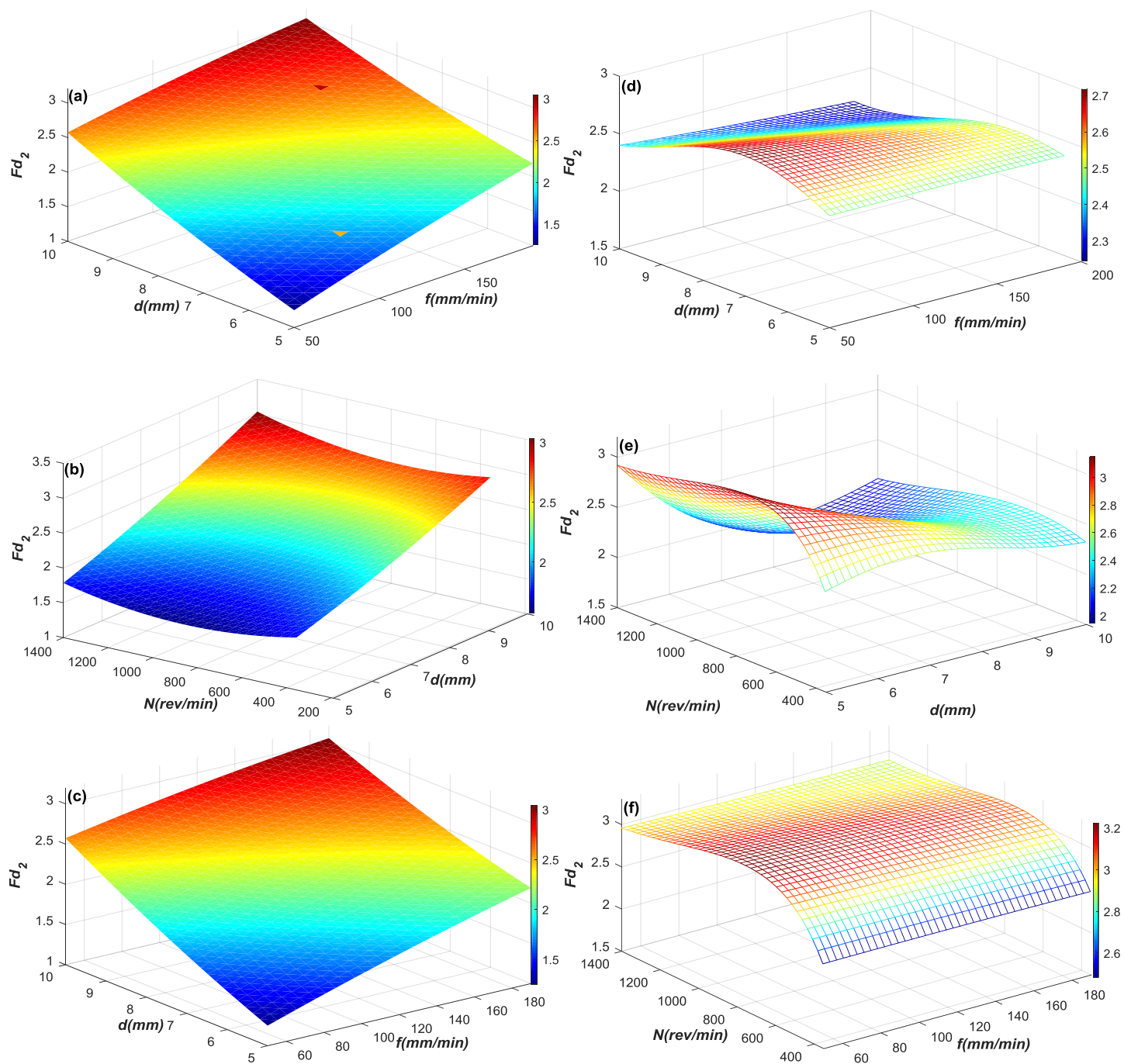


Figure V.10 Comparaison entre les tracés de surface 3D du facteur de délaminage pour  $Fd_2$  par rapport à  $f$ ,  $N$  et  $d$  des biocomposites élaborés (a-c) RSM et (d-f) ANN modèles.

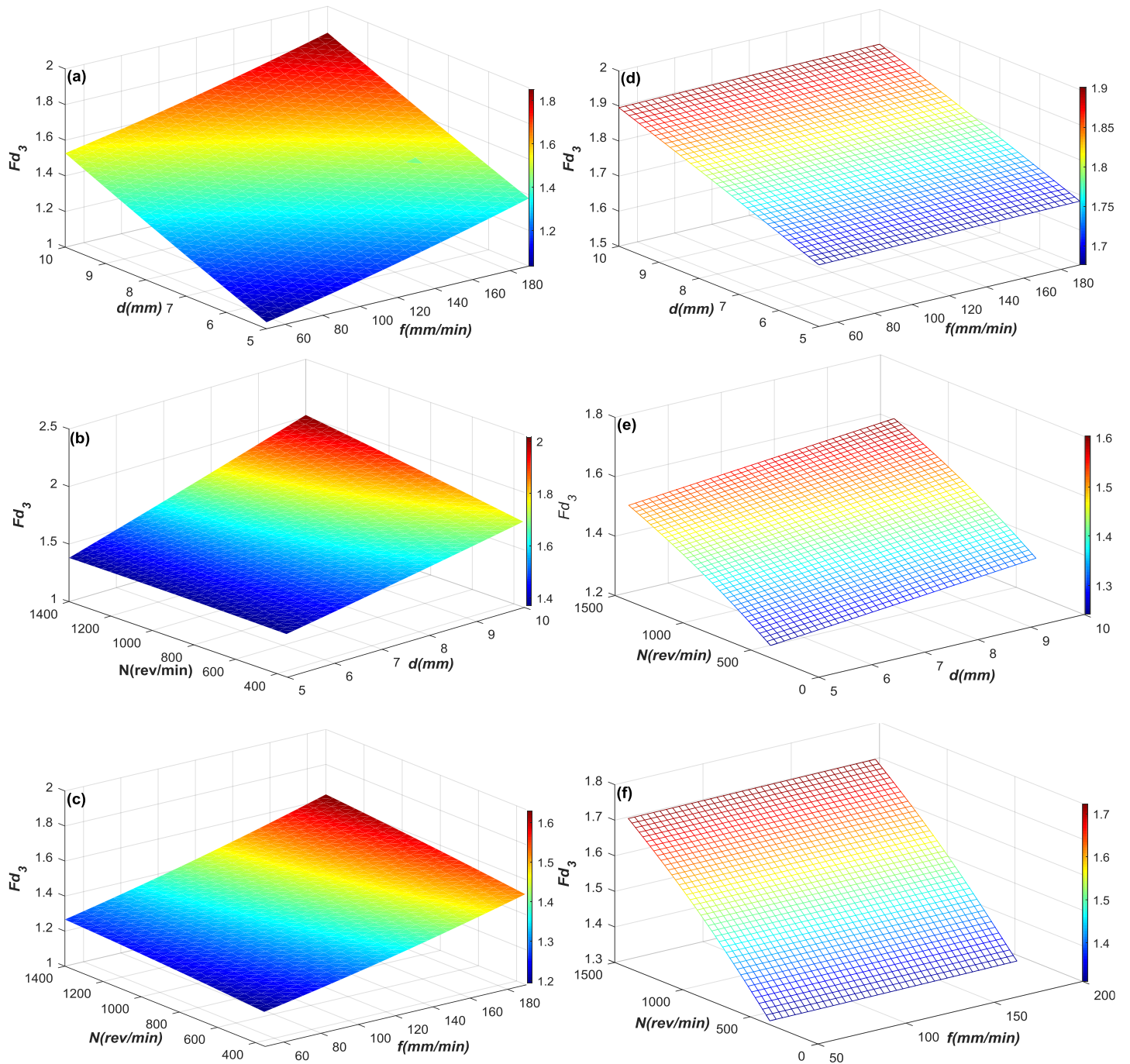


Figure V.11 Comparaison entre les tracés de surface 3D du facteur de délaminage pour  $Fd_3$  par rapport à  $f$ ,  $N$  et  $d$  des biocomposites élaborés (a-c) RSM et (d-f) ANN modèles.

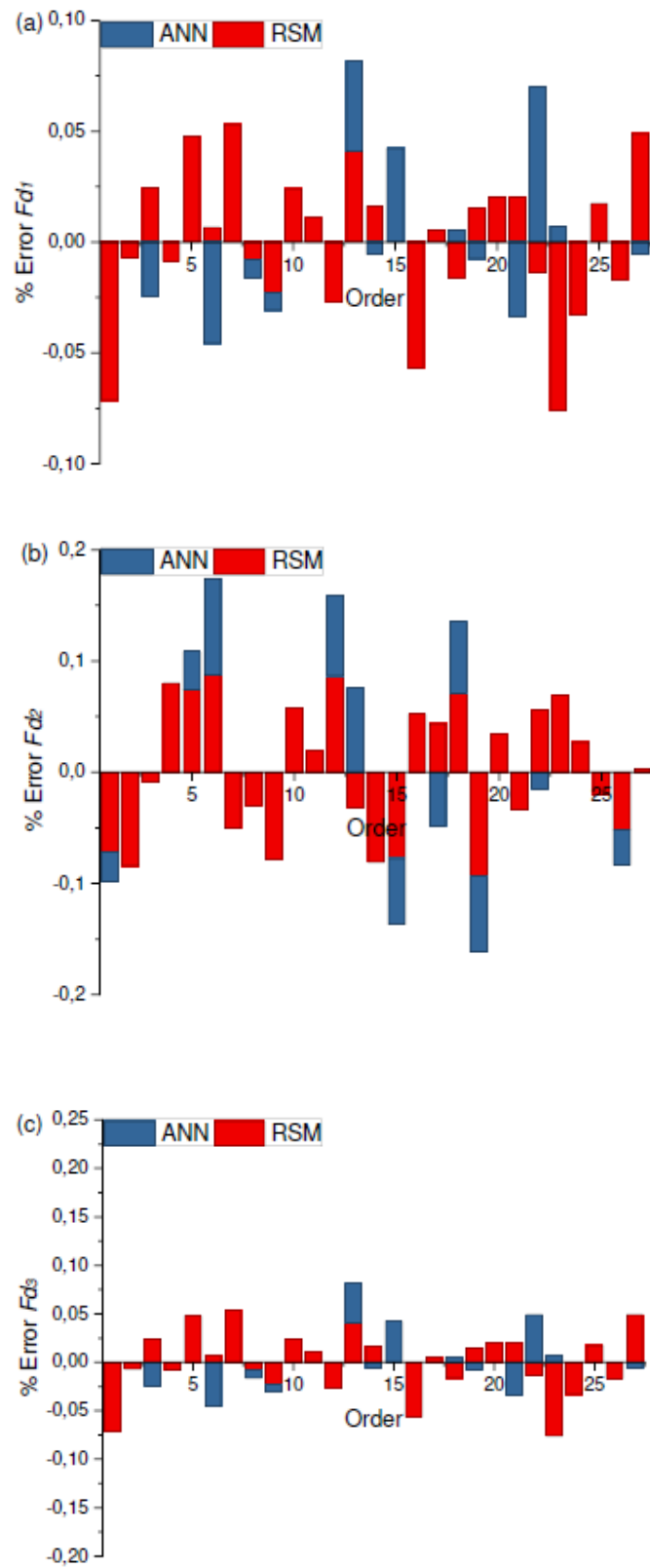


Figure V.12 Résidus Fd pour RSM et ANN (a) données Fd1, (b) données Fd2 et (b) données Fd3.

## V.6 Conclusion

- Ce chapitre a introduit les réseaux de neurones, précisé leurs définitions, les concepts de base de cette technique, la formation des réseaux de neurones, et leurs différents domaines d'application. Ce chapitre a permis de présenter un schéma général sur le neurone et l'ensemble des réseaux de neurones incluant leurs modes d'apprentissage, les exigences des conditions d'utilisation, les avantages et les limites. Ils peuvent donc tous être utiles pour la modélisation des phénomènes à régression non linéaire, nous nous sommes plus intéressés suivant l'accessibilité au perceptron multicouche (MPL) à fonction d'activation sigmoïde.
- Les résultats des modèles prédictifs et les mesures expérimentales se sont révélés en parfaite concordance
- Le pourcentage de l'erreur absolue maximale dans la prédiction du modèle ANN des facteurs de délamination Fd1, Fd2 et Fd3 est de 6,99%, 8,71% et 4,89%, respectivement, par rapport à 7,58%, 9,36% et 7,14% dans le modèle RSM.
- La concordance entre les modèles ANN et RSM, utilisés pour prédire les paramètres de coupe dans les processus de forage, et les données expérimentales est très élevée. La comparaison des résultats expérimentaux avec ceux prédits par les modèles RSM et ANN révèle que les modèles ANN sont plus précis et génèrent d'excellents résultats

## Conclusion général et perspectives

Face à la menace mondiale actuelle que représente la pollution, il est désormais impératif de s'orienter vers des matériaux écologiques. Les biocomposites à base de polymères renforcés de fibres naturelles constituent un excellent compromis pour les applications légères. En effet, ce type de matériaux convient aux applications de haute technologie et offre notamment de nombreux avantages face à certains composés renforcés de fibres synthétiques, comme une meilleure isolation thermique ou encore une faible densité. Ce domaine est devenu intéressant pour les chercheurs et les industries désireux de créer des matériaux alternatifs efficaces et respectueux de l'environnement. Dans ce contexte, le présent travail de thèse a été entrepris dont voici les principales conclusions :

- Sur la base de la combinaison des paramètres de coupe dans le processus de perçage, il apparaît clairement qu'une combinaison de faible vitesse d'avance et de petit diamètre d'outil est nécessaire pour minimiser le facteur de délaminage.
- Le matériau et la vitesse d'avance par rapport au diamètre du foret ont une importance prédominante sur le facteur de délamination, et il a été remarqué que la vitesse de coupe n'a aucune influence sur celui-ci.
- Pour une meilleure qualité de trou en perçage avec support constitué d'une structure biosandwich constituée d'une matrice époxy renforcée de fibres bidirectionnelles en jute et en liège (JFCE), la vitesse de broche élevée (50 mm/min), la vitesse d'avance faible (1399.99 rev/min) et un diamètre du foret (5.61 mm) sont recommandées comme conditions d'opération pour la géométrie de perçage Twist drills (HSS-TiN).
- L'étude du perçage de stratifiés à fibres de lin unidirectionnelles serait intéressante afin de valider les conclusions de cette étude. L'exploitation des stratifiés bidirectionnels n'est pas habituelle car il y a peu d'applications industrielles pour ce type de composite.
- Présentation des réseaux de neurones, en spécifiant leurs définitions, les concepts de base de cette technique, l'apprentissage des réseaux de neurones, et ses différents domaines d'utilisation. Une étude sur l'algorithme de rétro propagation qui a prouvé son efficacité dans la pratique grâce à ses capacités d'apprentissage et d'identification a été menée.
- Le schéma général sur le neurone et l'ensemble des réseaux de neurones, les exigences des conditions d'utilisation, les avantages et les limites ont été exposés. Ces réseaux sont capables de modéliser des phénomènes en utilisant la régression non linéaire, cependant

le perceptron multicouche (MPL) ayant une fonction d'activation sigmoïde nous semble être le plus adapté.

### **Recommandations pour des travaux futurs et perspectives**

Cette étude s'est limitée aux composites bidirectionnels afin de pouvoir analyser l'effet des paramètres de coupe sur le délaminage. Plusieurs recommandations peuvent être faites pour la suite des travaux à fin d'approfondir la recherche et surmonter ses limites.

- Approfondir l'étude sur la rugosité de surface pour la vitesse de coupe moyenne.
- Afin de s'assurer que la tenue en service, sous sollicitation en flexion, n'est pas dégradée par l'opération de perçage, des essais mécaniques s'avèrent nécessaire pour voir l'influence de la qualité des trous produits avec les paramètres de coupe testés sur la résistance et le module d'élasticité en flexion.
- Approfondir l'analyse des effets des paramètres de coupe sur les propriétés mécaniques en flexion en variant les plages de distance d'appuis des éprouvettes. Ceci dans le but d'optimiser la valeur de la distance permettant un niveau de qualité plus pertinente.

# Références

---

## CHAPITRE I

---

- [1] Jones, R.M. (1999). *Mechanics of Composite Materials*, Taylor and Francis Inc., pp.31-33.
- [2] Verma, D., Gope, P. C., Shandilya, A., Gupta, A., & Maheshwari, M. K. (2013). Coir Fiber Reinforcement and Application in Polymer Composites: A Review, *Journal of Material & Environment Science*, 4, pp. 263-276.
- [3] PrakashReddy, B., Satish, S., & ThomasRenald, C.J. (2007). Investigation on Tensile and Flexural Properties of Coir Fiber Reinforced Isophthalic Polyester Composites Composites Part B: Engineering, 42(6), pp.1648-1656.
- [4] Annamalai, K., Patil, R., Arjun, C. C., & Pillariseti, V. (2011). Influence of e-glass and graphite particle on Al-356 alloy composite produced by vortex method. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(2).
- [5] Mohanty, A.K., Misra, M., and Drzal, L.T. (2002) "Sustainable bio composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world." *J Polymers and the Environment*, 10: 19-26.
- [6] Wambua, P., Ivens, J. and Veroest, I. (2003) " Natural fibers: can they replace glass in fiber reinforced plastics." *Composites Science and Technology*, 63(9):1259-1264.
- [7] Gamstedt, E. K. and Almgren, K. M. (2007) " Natural fiber composites - with special emphasis on effects of the interface between cellulosic fibers and polymers." *Proceedings of the 28<sup>th</sup> Ris\* International Symposium on Materials Science*.
- [8] Hinrichsen, G., Khan, M.A. and Mohanty, A.K., (2000), "Composites": Part A, Elsevier Science Ltd, 31:pp.143–150.
- [9] Vazquez, A., Dominguez V. A., Kenny J. M., (1999), "Bagasse Fiber-Polypropylene Based Composites." *Journal of Thermoplastic Composite Materials.* Volume 12, (6): pp. 477-497.
- [10] Vinay Kumar<sup>1</sup>, Shishir Sinha, Manohar Singh,Saini, Bikram Kishore Kanungo and Prakash Biswas "Rice husk as reinforcing filler in polypropylene composites " *Rev Chem Eng* 26 (2010): 41–53 \_ 2010 by Walter de Gruyter • Berlin • New York. DOI 10.1515/REVCE.2010.001
- [11] W. He, R. Benson, 4 - Polymeric Biomaterials, in: K. Modjarrad, S.B.T.-H. of P.A. in M. and M.D. Ebnasajjad (Eds.), *Plast. Des. Libr.*, William Andrew Publishing, Oxford, 2014: pp. 55–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-22805-3.00004-9>.
- [12] A.K. Bledzki, J. Gassan, *Composites reinforced with cellulose based fibres*, *Prog. Polym. Sci.* 24 (1999) 221–274.
- [13] D. Jones, G.O. Ormondroyd, S.F. Curling, C.-M. Popescu, M.-C. Popescu, 2 - Chemical compositions of natural fibres, in: M. Fan, F.B.T.-A.H.S.N.F.C. in C. Fu (Eds.), *Woodhead Publishing*, 2017: pp. 23–58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00002-9>.
- [14] <https://doi.org/10.1080/10667857.2000.11752892>.
- [15] S.R. Djafari Petroudy, 3 - Physical and mechanical properties of natural fibers, in: M. Fan, F.B.T.-A.H.S.N.F.C. in C. Fu (Eds.), *Woodhead Publishing*, 2017: pp. 59–83. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0>.
- [16] S. Chaitanya, I. Singh, Novel Aloe Vera fiber reinforced biodegradable composites—Development and characterization, *J. Reinf. Plast. Compos.* 35 (2016) 1411–1423.

<https://doi.org/10.1177/0731684416652739>.

- [17] A. Bourmaud, J. Beaugrand, D.U. Shah, V. Placet, C. Baley, Towards the design of high-performance plant fibre composites, *Prog. Mater. Sci.* 97 (2018) 347–408. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.005>.
- [18] M.J. Mochane, T.C. Mokhena, E.R. Sadiku, S.S. Ray, T.G. Mofokeng, Green Polymer Composites Based on Polylactic Acid (PLA) and Fibers BT - Green Biopolymers and their Nanocomposites, in: D. Gnanasekaran (Ed.), Springer Singapore, Singapore, 2019: pp. 29–54. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8063-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8063-1_2).
- [19] R. Siakeng, M. Jawaid, H. Ariffin, S.M. Sapuan, Mechanical, dynamic, and thermomechanical properties of coir/pineapple leaf fiber reinforced polylactic acid hybrid biocomposites, *Polym. Compos.* 40 (2019) 2000–2011. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.24978>.
- [20] L.F. Ballesteros, M. Michelin, A.A. Vicente, J.A. Teixeira, M.Â. Cerqueira, Functional Properties of Lignocellulosic Materials BT - Lignocellulosic Materials and Their Use in Bio-based Packaging, in: L.F. Ballesteros, M. Michelin, A.A. Vicente, J.A. Teixeira, M.Â. Cerqueira (Eds.), Springer International Publishing, Cham, 2018: pp. 35–47. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92940-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92940-8_3).
- [21] L. Zhang, J. Zhong, X. Ren, Natural Fiber-Based Biocomposites BT - Green Biocomposites: Manufacturing and Properties, in: M. Jawaid, S.M. Sapuan, O.Y. Alothman (Eds.), Springer International Publishing, Cham, 2017: pp. 31–70. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46610-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46610-1_3).
- [22] M. Shafiei, R. Kumar, K. Karimi, Pretreatment of Lignocellulosic Biomass BT - Lignocellulose-Based Bioproducts, in: K. Karimi (Ed.), Springer International Publishing, Cham, 2015: pp. 85–154. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14033-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14033-9_3).
- [23] L. Sisti, G. Totaro, M. Vannini, A. Celli, Retting Process as a Pretreatment of Natural Fibers for the Development of Polymer Composites BT - Lignocellulosic Composite Materials, in: S. Kalia (Ed.), Springer International Publishing, Cham, 2018: pp. 97–135. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68696-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68696-7_2).
- [24] R. Kozłowski, M. Władyska-Przybylak, Uses of Natural Fiber Reinforced Plastics BT - Natural Fibers, Plastics and Composites, in: F.T. Wallenberger, N.E. Weston (Eds.), Springer US, Boston, MA, 2004: pp. 249–274. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9050-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9050-1_14).
- [25] Oksman, K., M. Skrifvars, and J.F.Selin, (2003), “Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites,” *Composites Science and Technology*, 2003. 63: pp. 1317-1324.
- [26] Valadez-Gonzales, A., Cetvantes-Uc, J.M., Olayo, R. and Herrera Franco, P.J., (1999), “Effect of fibre surface treatment on the fibre-matrix bond strength of natural fibre reinforced composites”, *Composites, Part B* 30 (3): pp.309–320.
- [27] Singleton, A.C.N., Baillie, C.A., Beaumont, P.W.R. and Peijs, T., (2003), *Compos B: Eng* 34:519
- [28] Rana AK, Mandal A, Bandyopadhyay B. (2003), “Short jute fiber reinforced composites: effect of compatibilizer, impact modifier and fiber loading.” *Compos Sci Technol*; 63: pp.801–806.
- [29] Mukherjee, R.N., Pal S.K., Sanyal S.K., Phani K.K., (1984), “Role of interface in fiber reinforced polymer composites with special reference to natural fibers.” *Journal of Polymer Material*, (1): pp. 69-81.
- [30] Zadorecki, P. and Flodin, P., (1985), “Surface modification of cellulose fibres. II. The effect of cellulose fibre treatment on the performance of cellulose– polyester composites.” *J Appl Polym Sci*, (3): pp. 3971–3983.
- [31] Xue, Li., Lope G. and Panigrahi, S., (2007) “Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber reinforced composites: A review”. *Springer Science*, Volume 15: pp. 25-33.
- [32] Mohanty, A.K., Misra, M. and Drzal, L.T., (2001), *Compos Interfaces* 8: pp.313.
- [33] Agrawal, R., Saxena, N.S., Sharma, K.B., Thomas, S. and Sreekala, M.S., (2000), *Material Science Engg. A* 277: pp.77.

- [34] Jahn, A., Schroder, M.W., Futing, M. and Schezel, K, Diepenbrock, (2002), *Wear* , Spectrochim,Acta A: Mol Biomol Spectrosc 58: pp.2271.
- [35] Paul, S., Puja, N. and Rajive, G., (2003). *Molecules* 8: pp.374
- [36] Manikandan Nair, K.C., Diwan, S.M. and Thomas, S., (1996), "Tensile properties of short sisal fiber reinforced polystyrene composites", *J. Appl Polym. Sci.* 60: pp.1483–1497.
- [37] Joseph, K., L.H.C. Mattoso, R.D. Toledo, S. Thomas, de-Carvalho, L.H., Pothen, L., Kala, S. and James, B., (2000), "Natural fiber reinforced thermoplastic composites, In *Natural Polymers and Agrofibers Composites*, ed. E. Frollini, A.L. Leão and L.H.C. Mattoso, 159-201. São Carlos, Brazil: Embrapa, USP-IQSC, UNESP
- [38] Wang, B., (2004), MSc. Thesis. University of Saskatchewan.
- [39] Karlsson, J. O. and P. Gatenholm. 1999. Cellulose fibre-supported pH-sensitive hydrogels. *Polymer* 40(2): 379-387.
- [40] Bledzki, A. K. and J. Gassan. 1999. Composites reinforced with cellulose based fibers. *Progress in Polymer Science* 24: 221-274.
- [41] Sreekala, M. S., M. G. Kumaran, S. Joseph, M. Jacob and S. Thomas. 2000. Oil palm fiber reinforced phenol formaldehyde composites: Influence of fiber surface modifications on the mechanical performance. *Applied Composite Materials* 7: 295-229.
- [42] Sreekala, M. S., M. G. Kumaran and S. Thomas. 2002. Water sorption in oil palm fiber reinforced phenol formaldehyde composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33: 763-777.
- [43] Wallenberger, F. T. and N. Weston. 2004. *Natural Fibers, Plastics and Composites*. New York, NY: Kluwer Academic Publishers.
- [44] Paul, A., K. Joseph and S. Thomas. 1997. Effect of surface treatments on the electrical properties of low-density polyethylene composites reinforced with short sisal fibers. *Composites Science and Technology* 57(1):67-79.
- [45] Mishra, S., M. Misra, S. S. Tripathy, S. K. Nayak and A. K. Mohanty. 2002. The influence of chemical surface modification on the performance of sisalpolyester biocomposites. *Polymer Composites* 23(2): 164-170.
- [46] Joseph, K. and S. Thomas. 1996. Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fiber-reinforced polyethylene composites. *Polymer* 37: 5139-5149
- [47] Sreekala, M. S. and S. Thomas. 2003. Effect of fibre surface modification on watersorption characteristics of oil palm fibres. *Composites Science and Technology* 63(6): 861-869.
- [48] Nair, K. C. M., S. Thomas and G. Groeninckx. 2001. Thermal and dynamic mechanical analysis of polystyrene composites reinforced with short sisal fibres. *Composites Science and Technology* 61(16): 2519-2529.
- [49] Hill, A. S. C., H. P. S. Abdul Khalil and M. D. Hale. 1998. A study of the potential of acetylation to improve the properties of plant fibres. *Industrial Crops and Products* 8(1): 53-63.
- [50] Joseph, P. V., K. Joseph, S. Thomas, C. K. S. Pillai, V. S. Prasad, G. Groeninckx and M. Sarkissova. 2003. The thermal and crystallisation studies of short sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 34(3): 253-266.
- [51] Oever, M. and T. Peijs. 1998. Continuous-glass-fibre-reinforced polypropylene composites II. Influence of maleic-anhydride modified polypropylene on fatigue behaviour. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 29(3): 227-239.
- [52] Gassan, J. and A. K. Bledzki. 1997. The influence of fiber-surface treatment on the mechanical properties of jute-polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 28: 1001–1005.
- [53] George, J., R. Janardhan, J. S. Anand, S. S. Bhagawan and S. Thomas. 1996. Melt rheological

- behaviour of short pineapple fibre reinforced low density polyethylene composites. *Polymer* 37(24): 5421-5431.
- [54] Maldas, D., B. V. Kokat, and C. Daneault. 1989. Influence of coupling agents and treatments on the mechanical properties of cellulose fiber-polystyrene composites. *Journal of Applied Polymer Science* 37: 751-775.
- [55] Zafeiropoulos, N. E. 2002. Engineering and characterisation of the interface in flax fiber/polypropylene composite materials. Part I. Development and investigation of surface treatments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33: 1083-1093.
- [56] Haigler, C. H., (1985), "The Functions and Biogenesis of Native Cellulose," Cellulose Chemistry and Its Applications. T. P. Nevell and S. H. Zeronian. West Sussex, Ellis Horwood Limited: pp.30-83.
- [57] Thygesen, A. et al.,(2006), "Comparison of composites made from fungal de-fibrated hemp with composites of traditional hemp yarn, " Industrial Crops and Products.
- [58] Rowell, R.M., Young, R.A., and Rowell, J.K., (1997), "Chemical Composition of Fibers: Paper and Composites from Agro-based Resources," Lewis Publishers, CRC Press: pp.85-91.
- [59] Bjerre, A.B. and Schmidt, A.S., (1997), "Development of chemical and biological processes for production of bioethanol: Optimization of the wet oxidation process and characterization of products," Riso-R-967(EN), Riso National Laboratory: pp. 5-9.
- [60] Morvan, C., Jauneau, A., Flaman, A., Millet, J. and Demarty, M., (1990), "Degradation of flax polysaccharides with purified endo-polygalacturonase", *Carbohydrate Polymers*, 13(2): pp.149-163.
- [61] Madsen, B., (2004), "Properties of plant fibre yarn polymer composites – An experimental study," (2004), PhD Thesis, Department of civil Engineering, Technical University of Denmark.
- [62] Sakakibara, A. and Shiraishi, N., (1991), "Wood and Cellulose Chemistry," New York: Marcel Dekker.
- [63] Rowell, R.M., (1995), "A new generation of composite materials from agro-based fibre," in The Third International Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [64] Lubin, Hand book of composites, Van Nostarnd, New York, 1982.
- [65] Encyclopedia of Polymer Science Engineering, H.F. Mark Edition, John Wiley and Sons, New York,1985
- [66] D.K. Rajak, D.D. Pagar, R. Kumar, C.I. Pruncu, Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials, *J. Mater. Res. Technol.* 8 (2019) 6354–6374. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>.
- [67] T.-D. Ngo, Introduction to composite materials, *Compos. Nanocomposite Mater. From Knowl. to Ind. Appl.* (2020).
- [68] T.D. Tavares, J.C. Antunes, F. Ferreira, H.P. Felgueiras, Biofunctionalization of Natural Fiber-Reinforced Biocomposites for Biomedical Applications, *Biomol.* . 10 (2020). <https://doi.org/10.3390/biom10010148>.
- [69] P.H.F. Pereira, M. de F. Rosa, M.O.H. Cioffi, K.C.C. de C. Benini, A.C. Milanese, H.J.C. Voorwald, D.R. Mulinari, Vegetal fibers in polymeric composites: a review, *Polímeros*. 25 (2015) 9–22.
- [70] M. Yang, F. Wang, S. Zhou, Z. Lu, S. Ran, L. Li, J. Shao, Thermal and mechanical performance of unidirectional composites from bamboo fibers with varying volume fractions, *Polym. Compos.* 40 (2019) 3929–3937. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.25253>.
- [71] Y. Song, U. Gandhi, A. Koziel, S. Vallury, A. Yang, Effect of the initial fiber alignment on the mechanical properties for GMT composite materials, *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 31 (2017) 91–109. <https://doi.org/10.1177/0892705716681400>.

- [72] A. V. Ratna Prasad, K. Mohana Rao, Mechanical properties of natural fibre reinforced polyester composites: Jowar, sisal and bamboo, *Mater. Des.* 32 (2011) 4658–4663. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.015>.
- [73] G. George, E. Tomlal Jose, K. Jayanarayanan, E.R. Nagarajan, M. Skrifvars, K. Joseph, Novel bio-commingled composites based on jute/polypropylene yarns: Effect of chemical treatments on the mechanical properties, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 43 (2012) 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.10.011>.
- [74] composites, *J. Indian Acad. Wood Sci.* 17 (2020) 1–8. <https://doi.org/10.1007/s13196-019-00244-x>.
- [75] N. Venkateshwaran, A. ElayaPerumal, A. Alavudeen, M. Thiruchitrabalam, Mechanical and water absorption behaviour of banana/sisal reinforced hybrid composites, *Mater. Des.* 32 (2011) 4017–4021. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.002>.
- [76] V. Chaudhary, P.K. Bajpai, S. Maheshwari, Studies on Mechanical and Morphological Characterization of Developed Jute/Hemp/Flax Reinforced Hybrid Composites for Structural Applications, *J. Nat. Fibers.* 15 (2018) 80–97. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1320260>.
- [77] T.G. Yashas Gowda, M.R. Sanjay, K. Subrahmanya Bhat, P. Madhu, P. Senthamaraikannan, B. Yogesha, Polymer matrix-natural fiber composites: An overview, *Cogent Eng.* 5 (2018) 1446667. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1446667>.
- [78] B. Mano, J.R. Araújo, M.A.S. Spinacé, M.-A. De Paoli, Polyolefin composites with curaua fibres: Effect of the processing conditions on mechanical properties, morphology and fibres dimensions, *Compos. Sci. Technol.* 70 (2010) 29–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.09.002>.
- [79] A. Le Duc, B. Vergnes, T. Budtova, Polypropylene/natural fibres composites: Analysis of fibre dimensions after compounding and observations of fibre rupture by rheo-optics, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 42 (2011) 1727–1737. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.07.027>.
- [80] Z.L. Yan, H. Wang, K.T. Lau, S. Pather, J.C. Zhang, G. Lin, Y. Ding, Reinforcement of polypropylene with hemp fibres, *Compos. Part B Eng.* 46 (2013) 221–226. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.027>.
- [81] N. Le Moigne, M. van den Oever, T. Budtova, A statistical analysis of fibre size and shape distribution after compounding in composites reinforced by natural fibres, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 42 (2011) 1542–1550. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.07.012>.
- [82] M.M. Ibrahim, A. Dufresne, W.K. El-Zawawy, F.A. Agblevor, Banana fibers and microfibrils as lignocellulosic reinforcements in polymer composites, *Carbohydr. Polym.* 81 (2010) 811–819. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.057>.
- [83] M. Brahmakumar, C. Pavithran, R.M. Pillai, Coconut fibre reinforced polyethylene composites: Effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites, *Compos. Sci. Technol.* 65 (2005) 563–569. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.09.020>.
- [84] M.R. Rahman, M.N. Islam, M.M. Huque, S. Hamdan, A.S. Ahmed, Effect of chemical treatment on rice husk (RH) reinforced polyethylene (PE) composites., *BioResources.* 5 (2010) 854–869.
- [85] E. Ozen, A. Kiziltas, E.E. Kiziltas, D.J. Gardner, Natural fiber blend—nylon 6 composites, *Polym. Compos.* 34 (2013) 544–553. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.22463>.
- [86] C. Pang, R. Shanks, K. Ing, F. Daver, Plasticised cellulose acetate-natural fibre composite, *World J. Eng.* 10 (2013) 405–410. <https://doi.org/10.1260/1708-5284.10.5.405>.
- [87] C. Pang, R.A. Shanks, F. Daver, Bio-composites based on cellulose acetate and kenaf fibers: Processing and properties, *AIP Conf. Proc.* 1593 (2014) 350–353. <https://doi.org/10.1063/1.4873798>.
- [88] M.C. Gutiérrez, M.-A. De Paoli, M.I. Felisberti, Biocomposites based on cellulose acetate and

- short curauá fibers: Effect of plasticizers and chemical treatments of the fibers, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 43 (2012) 1338–1346. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.03.006>.
- [89] P.R.L. Lima, H.M. Santos, G.P. Camilloto, R.S. Cruz, Effect of Surface Biopolymeric Treatment on Sisal Fiber Properties and Fiber-Cement Bond, *J. Eng. Fiber. Fabr.* 12 (2017) 155892501701200200. <https://doi.org/10.1177/155892501701200207>.
- [90] A.S. Singha, R.K. Rana, Natural fiber reinforced polystyrene composites: Effect of fiber loading, fiber dimensions and surface modification on mechanical properties, *Mater. Des.* 41 (2012) 289–297. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.001>.
- [91] S. Mishra, J.B. Naik\*, Effect of Treatment of Maleic Anhydride on Mechanical Properties of Natural Fiber: Polystyrene Composites, *Polym. Plast. Technol. Eng.* 44 (2005) 663–675. <https://doi.org/10.1081/PTE-200057814>.
- [92] S. Nayak, J.R. Mohanty, P.R. Samal, B.K. Nanda, Polyvinyl Chloride Reinforced with Areca Sheath Fiber Composites—An Experimental Study, *J. Nat. Fibers.* 17 (2020) 781–792. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1534186>.
- [93] pipes made from bamboo vs. polyvinyl chloride, *J. Clean. Prod.* 240 (2019) 118172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118172>.
- [94] L. Jiang, C. He, J. Fu, X. Li, Wear behavior of alkali-treated sorghum straw fiber reinforced polyvinyl chloride composites in corrosive water conditions, *BioResources.* 13 (2018) 3362–3376.
- [95] L. Wang, C. He, X. Yang, Effects of pretreatment on the soil aging behavior of rice husk fibers/polyvinyl chloride composites, *BioResources.* 14 (2019) 59–69.
- [96] H. Liu, Q. Wu, Q. Zhang, Preparation and properties of banana fiber-reinforced composites based on high density polyethylene (HDPE)/Nylon-6 blends, *Bioresour. Technol.* 100 (2009) 6088–6097. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.076>.
- [97] J.R. Araujo, B. Mano, G.M. Teixeira, M.A.S. Spinacé, M.-A. De Paoli, Biomicrofibrillar composites of high density polyethylene reinforced with curauá fibers: Mechanical, interfacial and morphological properties, *Compos. Sci. Technol.* 70 (2010) 1637–1644. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.06.006>.
- [98] A. Choudhury, Isothermal crystallization and mechanical behavior of ionomer treated sisal/HDPE composites, *Mater. Sci. Eng. A.* 491 (2008) 492–500. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.03.011>.
- [99] K.C.C. Carvalho, D.R. Mulinari, H.J.C. Voorwald, M.O.H. Cioffi, Chemical modification effect on the mechanical properties of hips/coconut fiber composites, *BioResources.* 5 (2010) 1143–1155.
- [100] P. Antich, A. Vázquez, I. Mondragon, C. Bernal, Mechanical behavior of high impact polystyrene reinforced with short sisal fibers, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 37 (2006) 139–150. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.12.002>.
- [102] K.C.C.C. Beninia, H.J.C. Voorwald, M.O.H. Cioffi, Mechanical properties of HIPS/sugarcane bagasse fiber composites after accelerated weathering, *Procedia Eng.* 10 (2011) 3246–3251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.536>.
- [103] K.J. Wong, S. Zahi, K.O. Low, C.C. Lim, Fracture characterisation of short bamboo fibre reinforced polyester composites, *Mater. Des.* 31 (2010) 4147–4154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.029>.
- [104] P.A. Sreekumar, P. Albert, G. Unnikrishnan, K. Joseph, S. Thomas, Mechanical and water sorption studies of ecofriendly banana fiber-reinforced polyester composites fabricated by RTM, *J. Appl. Polym. Sci.* 109 (2008) 1547–1555. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.28155>.
- [105] M. Mariatti, M. Jannah, A. Abu Bakar, H.P.S.A. Khalil, Properties of Banana and Pandanus Woven Fabric Reinforced Unsaturated Polyester Composites, *J. Compos. Mater.* 42 (2008) 931–941. <https://doi.org/10.1177/0021998308090452>.

- [106] S.N. Monteiro, R.C.M.P. Aquino, F.P.D. Lopes, Performance of curaua fibers in pullout tests, *J. Mater. Sci.* 43 (2008) 489–493. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1874-5>.
- [107] K. Charlet, J.P. Jernot, M. Gomina, L. Bizet, J. Bréard, Mechanical properties of flax fibers and of the derived unidirectional composites, *J. Compos. Mater.* 44 (2010) 2887–2896. <https://doi.org/10.1177/0021998310369579>.
- [108] M.A. Sawpan, K.L. Pickering, A. Fernyhough, Effect of fibre treatments on interfacial shear strength of hemp fibre reinforced polylactide and unsaturated polyester composites, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 42 (2011) 1189–1196. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.05.003>.
- [109] K. Sever, M. Sarikanat, Y. Seki, G. Erkan, Ü.H. Erdoğan, S. Erden, Surface treatments of jute fabric: The influence of surface characteristics on jute fabrics and mechanical properties of jute/polyester composites, *Ind. Crops Prod.* 35 (2012) 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.05.020>.
- [110] L.U. Devi, S.S. Bhagawan, S. Thomas, Dynamic mechanical properties of pineapple leaf fiber polyester composites, *Polym. Compos.* 32 (2011) 1741–1750. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.21197>.
- [111] M. Idicula, A. Boudenne, L. Umadevi, L. Ibos, Y. Candau, S. Thomas, Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites, *Compos. Sci. Technol.* 66 (2006) 2719–2725. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.03.007>.
- [112] P.A. Sreekumar, S.P. Thomas, J. marc Saiter, K. Joseph, G. Unnikrishnan, S. Thomas, Effect of fiber surface modification on the mechanical and water absorption characteristics of sisal/polyester composites fabricated by resin transfer molding, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 40 (2009) 1777–1784. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.08.013>.
- [113] C. Merlini, V. Soldi, G.M.O. Barra, Influence of fiber surface treatment and length on physico-chemical properties of short random banana fiber-reinforced castor oil polyurethane composites, *Polym. Test.* 30 (2011) 833–840. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.08.008>.
- [114] C.G. Mothé, C.R. de Araújo, Properties of polyurethane elastomers and composites by thermal analysis, *Thermochim. Acta.* 357–358 (2000) 321–325. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(00\)00403-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0040-6031(00)00403-2).
- [115] I.O. Bakare, F.E. Okieimen, C. Pavithran, H.P.S. Abdul Khalil, M. Brahmakumar, Mechanical and thermal properties of sisal fiber-reinforced rubber seed oil-based polyurethane composites, *Mater. Des.* 31 (2010) 4274–4280. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.013>.
- [116] S.M. Sapuan, A. Leenie, M. Harimi, Y.K. Beng, Mechanical properties of woven banana fibre reinforced epoxy composites, *Mater. Des.* 27 (2006) 689–693. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.12.016>.
- [117] A.P. Irawan, I.W. Sukania, Tensile Strength of Banana Fiber Reinforced Epoxy Composites Materials, *Appl. Mech. Mater.* 776 (2015) 260–263. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.776.260>.
- [118] S. Biswas, S. Kindo, A. Patnaik, Effect of fiber length on mechanical behavior of coir fiber reinforced epoxy composites, *Fibers Polym.* 12 (2011) 73–78. <https://doi.org/10.1007/s12221-011-0073-9>.
- [119] P.P. Gohil, A.A. Shaikh, Cotton-Epoxy Composites: Development and Mechanical Characterization, *Key Eng. Mater.* 471–472 (2011) 291–296. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.291>.
- [120] P.B. Gning, S. Liang, L. Guillaumat, W.J. Pui, Influence of process and test parameters on the mechanical properties of flax/epoxy composites using response surface methodology, *J. Mater. Sci.* 46 (2011) 6801–6811. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5639-9>.

- [121] C. Buksnowitz, R. Adusumalli, A. Pahler, H. Sixta, W. Gindl, Acoustical properties of Lyocell, hemp, and flax composites, *J. Reinf. Plast. Compos.* 29 (2010) 3149–3154. <https://doi.org/10.1177/0731684410367533>.
- [122] Y. Karaduman, L. Onal, Water absorption behavior of carpet waste jute-reinforced polymer composites, *J. Compos. Mater.* 45 (2010) 1559–1571. <https://doi.org/10.1177/0021998310385021>.
- [123] Composite Laminate, *J. Reinf. Plast. Compos.* 29 (2009) 1669–1680. <https://doi.org/10.1177/0731684409341672>.
- [124] N. Lopattananon, Y. Payae, M. Seadan, Influence of fiber modification on interfacial adhesion and mechanical properties of pineapple leaf fiber-epoxy composites, *J. Appl. Polym. Sci.* 110 (2008) 433–443. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.28496>.
- [125] T.P. Mohan, K. Kanny, Water barrier properties of nanoclay filled sisal fibre reinforced epoxy composites, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 42 (2011) 385–393. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.12.010>.
- [126] A.A. Betelie, A.N. Sinclair, M. Kortschot, Y. Li, D.T. Redda, Mechanical properties of sisal-epoxy composites as functions of fiber-to-epoxy ratio, *AIMS Mater. Sci.* 6 (2019) 985–996.
- [127] Dhingra, A.K. Metal replacement by composite. *Journal of Minerals, Metals and Materials Society*, 38(3), pp 17-17, 1986.
- [128] Mehrabian, R., Riek, R. G. and Flemings, M.C. Preparation and casting of Metal particulate non-metal composites. *Metallurgical Transactions*, 5(8), 1899-1905, 1974.
- [129] Eliasson, J. and Sandström, R. Applications of aluminium matrix composites. *Key Engineering Materials*, 104-107, pp. 3-36, 1995.
- [130] Eliasson, J. and Sandström, R. Applications of aluminium matrix composites. *Key Engineering Advani, S. G. and E. M. Sozer.* 2002. *Process Modeling in Composites Manufacturing*. New York, NY: Marcel Dekker, Inc.
- [131] Rosato, D. V., V. D. Rosato and G. M. Rosato. 2000. *Injection Molding Handbook, 3rd ed.* Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers.
- [132] Henson, F. 1997. *Plastic Extrusion Technology*, 2nd ed. New York. NY: Hanser Publishers.
- [133] ASM International. 2003. *Characterization and Failure Analysis of Plastics*. Materials Park, OH: The Materials Information Society - International.
- [134] Oladipo, A. B. and I. S. Wichman. 1999. Experimental study of opposed flow flame spread over wood fiber/thermoplastic composite materials. *Combustion and Flame* 118: 317-326.
- [135] Liu D, Tang Y, Cong WL. A review of mechanical drilling for composite laminates. *Compos Struct* 2012;94:1265–79.
- [136] Uhlmann E, Mullany B, Biermann D, Rajurkar KP, Hausotte T, Brinksmeier E. Process chains for high-precision components with micro-scale features. *CIRP Ann- Manuf Technol* 2016;65:549-72.
- [137] Singh AP, Sharma M, Singh I. A review of modeling and control during drilling of fiber reinforced plastic composites. *Compos Part B-Eng* 2013;47:118–25.
- [138] Shyha I, Soo SL, Aspinwall D, Bradley S. Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites. *J Mater Process Technol* 2010;210:1023–34.
- [139] Subramanian K, Cook NH. Sensing of drill wear and prediction of drill life. *Trans ASME J Eng Indus* 1997;99:295–301.
- [140] Sorrentino L, Turchetta S, Bellini C. A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control. *Compos Struct* 2018;186:154–64.

- [141] Jain, A., B. Singh, and Y. Shrivastava. 2019. Reducing the heat-affected zone during the laser beam drilling of basalt-glass hybrid composite. *Composites Part B: Engineering* 176:107294. doi:10.1016/j.compositesb.2019.107294.
- [142] Tewari, R., M. K. Singh, S. Zafar, and S. Powar. 2020. Parametric optimization of laser drilling of microwave-processed kenaf/HDPE composite. *Polymers and Polymer Composites*:0967391120905705. doi:10.1177/0967391120905705.
- [143] Dhakal, H. N., S. O. Ismail, S. O. Ojo, M. Paggi, and J. R. Smith. 2018. Abrasive water jet drilling of advanced sustainable bio-fibre-reinforced polymer/hybrid composites: A comprehensive analysis of machining-induced damage responses. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 99 (9):2833–47. doi:10.1007/s00170-018-2670-x.
- [144] Kalirasu, S., N. Rajini, S. Rajesh, J. T. Winowlin Jappes, and K. Karuppasamy. 2017. AWJM Performance of jute/ polyester composite using MOORA and analytical models. *Materials and Manufacturing Processes* 32 (15):1730–39. doi:10.1080/10426914.2017.1279314.
- [145] Sumesh, K. R., K. Kanthavel, and V. Kavimani. 2020. Machinability of hybrid natural fiber reinforced composites with cellulose micro filler incorporation. *Journal of Composite Materials* :0021998320918020. doi:10.1177/0021998320918020.
- [146] N. Abilash, M. Sivapragash, Optimizing the delamination failure in bamboo fiber reinforced polyester composite, *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.* 28 (2016) 92–102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.09.004>.
- [147] P.K. Bajpai, K. Debnath, I. Singh, Hole making in natural fiber-reinforced polylactic acid laminates: An experimental investigation, *J. Thermoplast. Compos. Mater.* (2017). <https://doi.org/10.1177/0892705715575094>.
- [148] *Composites, Mater. Manuf. Process.* 29 (2014) 1401–1409. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.941870>.
- [149] N. Parthipan, M. Ilangkumaran, T. Maridurai, S.C. Prasanna, Effect of Silane Treated Silicon (IV) Oxide Nanoparticle Addition on Mechanical, Impact Damage and Drilling Characteristics of Kenaf Fibre-Reinforced Epoxy Composite, *Silicon*. 12 (2020) 459–467. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00138-0>.
- [150] T.B. Yallem, P. Kumar, I. Singh, A study about hole making in woven jute fabric-reinforced polymer composites, *Proc IMechE Part L J Mater. Des. Appl.* 0 (2015) 1–11. <https://doi.org/10.1177/1464420715587750>.
- [151] M.M. Díaz-Álvarez A, Rubio-López Á, Santiuste C, Experimental analysis of drilling induced damage in biocomposites, *Text. Res. J.* 00 (2017) 1–15. <https://doi.org/10.1177/0040517517725118>.
- [152] A.T. Kuzu, M. Bakkal, The effect of cutting parameters and tool geometry on machinability of cotton-fiber reinforced polymer composites: Cutting forces, burr formation, and chip morphology, *J. Ind. Text.* (2016). <https://doi.org/10.1177/1528083714560253>.
- [153] M. Roy Choudhury, K. Debnath, A Study of Drilling Behavior of Unidirectional Bamboo Fiber-Reinforced Green Composites, *J. Inst. Eng. Ser. C.* 101 (2020) 219–227. <https://doi.org/10.1007/s40032-019-00550-w>.
- [154] R. Vinayagamorthy, I. V Manoj, G. Narendra Kumar, I. Sai Chand, G. V Sai Charan Kumar, K. Suneel Kumar, A central composite design based fuzzy logic for optimization of drilling parameters on natural fiber reinforced composite, *J. Mech. Sci. Technol.* 32 (2018) 2011–2020. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0409-0>.
- [155] Sridharan V, Raja T, Muthukrishnan N, Study of the Effect of Matrix , Fibre Treatment and Graphene on Delamination by Drilling Jute / Epoxy Nanohybrid Composite, *Arab J Sci Eng.* (2016) 10–14. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-2005-2>.

- [156] G. Rajaraman, S.K. Agasti, M.P. Jenarthanan, Investigation on effect of process parameters on delamination during drilling of kenaf-banana fiber reinforced in epoxy hybrid composite using Taguchi method, *Polym. Compos.* (2020). <https://doi.org/10.1002/pc.25431>.
- [157] G. Dilli Babu, K. Sivaji Babu, B. Uma Maheswar Gowd, Optimization of machining parameters in drilling hemp fiber reinforced composites to maximize the tensile strength using design experiments, *Indian J. Eng. Mater. Sci.* (2013).
- [158] N.S. Balaji, S. Jayabal, S. Kalyana Sundaram, A Neural Network Based Prediction Modeling for Machinability Characteristics of Zea Fiber-Polyester Composites, *Trans. Indian Inst. Met.* (2016). <https://doi.org/10.1007/s12666-015-0571-3>.
- [159] A.A. Abdul Nasir, A.I. Azmi, T. Chye Lih, A.N. Ahmad, N. Kyeun Kim, Tensile behaviour of open hole flax/epoxy composites: Influence of fibre lay-up and drilling parameters, *J. Compos. Mater.* (2019). <https://doi.org/10.1177/0021998318785955>.
- [160] V. Chaudhary, P.P. Gohil, Investigations on Drilling of Bidirectional Cotton Polyester Composite, *Mater. Manuf. Process.* 31 (2016) 960–968. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1059444>.
- [161] S.O. Ismail, H.N. Dhakal, E. Dimla, J. Beaugrand, I. Popov, Effects of drilling parameters and aspect ratios on delamination and surface roughness of lignocellulosic HFRP composite laminates, *J. Appl. Polym. Sci.* 133 (2016). <https://doi.org/10.1002/app.42879>.
- [162] A.A.A. Nasir, A.I. Azmi, A.N.M. Khalil, Measurement and optimisation of residual tensile strength and delamination damage of drilled flax fibre reinforced composites, *Measurement.* 75 (2015) 298–307. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.07.046>.
- [163] A.A. Abdul Nasir, A.I. Azmi, T.C. Lih, M.S. Abdul Majid, Critical thrust force and critical feed rate in drilling flax fibre composites: A comparative study of various thrust force models, *Compos. Part B Eng.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.134>.
- [164] S. Jayabal, S. Velumani, P. Navaneethakrishnan, K. Palanikumar, Mechanical and machinability behaviors of woven coir fiber-reinforced polyester composite, *Fibers Polym.* (2013). <https://doi.org/10.1007/s12221-013-1505-5>.
- [165] H. Rezghi Maleki, M. Hamed, M. Kubouchi, Y. Arao, Experimental investigation on drilling of natural flax fiber-reinforced composites, *Mater. Manuf. Process.* 34 (2019) 283–292. <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1532584>.
- [116] N. Venkateshwaran, A. ElayaPerumal, Hole quality evaluation of natural fiber composite using image analysis technique, *J. Reinf. Plast. Compos.* 32 (2013) 1188–1197. <https://doi.org/10.1177/0731684413486847>.
- [167] Venkateshwaran, N., and A. ElayaPerumal. 2013. Hole quality evaluation of natural fiber composite using image analysis technique. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 32 (16):1188–97. doi:10.1177/0731684413486847.
- [168] A. Jain, B. Singh, Y. Shrivastava, Reducing the heat-affected zone during the laser beam drilling of basalt-glass hybrid composite, *Compos. Part B Eng.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107294>.
- [169] R. Tewari, M.K. Singh, S. Zafar, S. Powar, Parametric optimization of laser drilling of microwave-processed kenaf/HDPE composite, *Polym. Polym. Compos.* (2021). <https://doi.org/10.1177/0967391120905705>.
- [170] S. Kalirasu, N. Rajini, S. Rajesh, J.T.W. Jappes, K. Karuppasamy, AWJM Performance of jute/polyester composite using MOORA and analytical models, *Mater. Manuf. Process.* (2017). <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1279314>.
- [171] H.N. Dhakal, S.O. Ismail, S.O. Ojo, M. Paggi, J.R. Smith, Abrasive water jet drilling of advanced sustainable bio-fibre-reinforced polymer/hybrid composites: a comprehensive analysis of machining-induced damage responses, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2018). <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2670-x>.

- [172] K.R. Sumesh, K. Kanthavel, V. Kavimani, Machinability of hybrid natural fiber reinforced composites with cellulose micro filler incorporation, *J. Compos. Mater.* (2020). <https://doi.org/10.1177/0021998320918020>.
- [173] K.M. Alagappan, S. Vijayaraghavan, M.P. Jenarathanan, R. Giridharan, Optimization of process parameters on drilling of natural fibres reinforced in epoxy resin matrices using Taguchi–Grey relational analysis, *Multidiscip. Model. Mater. Struct.* (2020). <https://doi.org/10.1108/MMMS-06-2019-0108>.
- [174] J. Arputhbalan, S. Prabhu, K. Palanikumar, S. Venkatesh, K. Vijay, Assay of machining attributes in drilling of natural hybrid fiber reinforced polymer composite, in: *Mater. Today Proc.*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.201>.
- [175] A.A. Abdul Nasir, A.I. Azmi, A.N.M. Khalil, Measurement and optimisation of residual tensile strength and delamination damage of drilled flax fibre reinforced composites, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 75 (2015) 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.07.046>.
- [176] S. Navaneethakrishnan, A. Athijayamani, Measurement and analysis of thrust force and torque in drilling of sisal fiber polymer composites filled with coconut shell powder, *Int. J. Plast. Technol.* (2016). <https://doi.org/10.1007/s12588-016-9139-2>.
- [177] A. Athijayamani, M. Thiruchitrabalam, U. Natarajan, B. Pazhanivel, Influence of alkali-treated fibers on the mechanical properties and machinability of roselle and sisal fiber hybrid polyester composite, *Polym. Compos.* 31 (2010) 723–731. <https://doi.org/10.1002/pc.20853>.
- [178] K. Debnath, M. Sisodia, A. Kumar, I. Singh, Damage-Free Hole Making in Fiber-Reinforced Composites: An Innovative Tool Design Approach, *Mater. Manuf. Process.* 31 (2016) 1400–1408. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1140191>.
- [179] V. Sridharan, N. Muthukrishnan, Optimization of machinability of polyester/modified jute fabric composite using grey relational analysis (GRA), *Procedia Eng.* 64 (2013) 1003–1012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.177>.
- [180] P.K. Bajpai, I. Singh, Drilling behavior of sisal fiber-reinforced polypropylene composite laminates, *J. Reinf. Plast. Compos.* 32 (2013) 1569–1576. <https://doi.org/10.1177/0731684413492866>.
- [181] A. Belaadi, H. Laouici, M. Bourchak, Mechanical and drilling performance of short jute fibre-reinforced polymer biocomposites: statistical approach, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04761-4>.
- [182] L.M.P. Durão, D.J.S. Gonçalves, J.M.R.S. Tavares, V.H.C. De Albuquerque, T.H. Panzera, L.J. Silva, A.A. Vieira, A.M. Baptista, Drilling delamination outcomes on glass and sisal reinforced plastics, *Mater. Sci. Forum.* 730–732 (2013) 301–306. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.301>.
- [183] H. Rezghi Maleki, M. Hamed, M. Kubouchi, Y. Arao, Experimental study on drilling of jute fiber reinforced polymer composites, *J. Compos. Mater.* 53 (2019) 283–295.
- [184] S. Jayabal, U. Natarajan, Drilling analysis of coir – fibre-reinforced polyester composites, *Bull. Mater. Sci.* 34 (2011) 1563–1567. <https://doi.org/doi.org/10.1007/s12034-011-0359-y>.
- [185] A. Hejjaji, D. Singh, S. Kubher, D. Kalyanasundaram, S. Gururaja, Machining damage in FRPs: Laser versus conventional drilling, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.11.036>.
- [186] S. Rao, A. Sethi, A.K. Das, N. Mandal, P. Kiran, R. Ghosh, A.R. Dixit, A. Mandal, Fiber laser cutting of CFRP composites and process optimization through response surface methodology, *Mater. Manuf. Process.* (2017). <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1279296>.
- [187] A.I. Azmi, Chip formation studies in machining fibre reinforced polymer composites, *Int. J. Mater. Prod. Technol.* (2013). <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2013.052790>.
- [188] N. Ramesha, Siddaramaiah, S. Akhtar, Abrasive water jet machining and mechanical behavior of

- banyan tree saw dust powder loaded polypropylene green composites, *Polym. Compos.* (2016). <https://doi.org/10.1002/pc.23348>.
- [189] V.A. Prabu, S.T. Kumaran, M. Uthayakumar, Performance Evaluation of Abrasive Water Jet Machining on Banana Fiber Reinforced Polyester Composite, *J. Nat. Fibers.* (2017). <https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1212768>.
- [190] R.S.G. P.D.Unde, M.D.Gayakwad, Abrasive Water Jet Machining Of Composite Materials– A Review, *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.* (2014).
- [191] M. Ramesh, K. Palanikumar, K.H. Reddy, Influence of Tool Materials on Thrust Force and Delamination in Drilling Sisal-glass Fiber Reinforced Polymer (S-GFRP) Composites, *Procedia Mater. Sci.* 5 (2014) 1915–1921. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.513>.
- [192] Jang BZ, *Advanced Polymer Composites: Principle and Applications.* ASM International, Materials Park, OH, 1994
- [193] Panigrahi S. K., Pradhan B. Through-the-width delamination damage propagation characteristics in single-lap laminated FRP composite joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 15<sup>th</sup> March 2008.
- [194] Liu D, Tang Y, Cong WL. A review of mechanical drilling for composite laminates. *Compos Struct* 2012;94:1265–79.
- [195] Hocheng H, Tsao CC. The path towards delamination-free drilling of composite materials. *J Mater Process Technol* 2005;167:251–64.
- [196] Girot F, Dau F, Gutiérrez-Orrantia ME. New analytical model for delamination of CFRP during drilling. *J Mater Process Technol* 2017;240:332–43.
- [197] M.M. Kabir, H. Wang, K.T. Lau, F. Cardona, Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview, *Compos. Part B Eng.* 43 (2012) 2883–2892. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>.
- [198] G.D. Babu, K.S. Babu, B.U.M. Gowd, Effect of Machining Parameters on Milled Natural Fiber-Reinforced Plastic Composites, *J. Adv. Mech. Eng.* (2013). <https://doi.org/10.7726/jame.2013.1001>.
- [199] Knops M., Bogle C., —Gradual failure in fibre/polymer laminates.|| *Composites Science And Technology*,66,5,2006.
- [200] Nairn J.A, Hu S, Talreja R, —*Damage Mechanics of Composite Materials*||, Elsevier Science, The Netherlands, 187, 1994.
- [201] Nairn J.A, Talreja R, Manson J.-Å. E. *Polymer Matrix Composites*, Elsevier Science, The Netherlands, 403, 2000.
- [202] McCartney L. N, *Composite Science & Technology*, 60, 2255, 2000.
- [203] Soma Dalbehera, EFFECT OF CENOSPHERE ON THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF NATURAL FIBER REINFORCED HYBRID COMPOSITE, Department of Industrial Design, August, 2016.

---

## CHAPITRE II

---

- [1] Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Liu, Y., Yang, G. C., & Zeng, H. M. (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 61(10), 1437-1447.
- [2] Allan, G.G., Carroll, P., Negri, A.R., Raghuraman, M., Ritzenthaler, P. and Yabiaoui, A. The micro porosity of pulp; the precipitation of inorganic fillers within the micropores of the cell wall. *Tappi*

- Journal, 75(1), 175-178,1992.
- [3] Lee, S.Y. Trans crystallization behaviour and interfacial strength of a semi crystalline polymer combined with thermo mechanical pulp (TMP) fiber. M.S.Thesis.University of Idaho, Maiscow, ID. 72 p. 2002
  - [4] Ma, C.G., Rong, M. Z., Zhang, M.Q. and Friedrich, K.Irradiation-induced surfacegraft polymerization onto calcium carbonate nanoparticles and its toughening effects on polypropylene composites. *Polymer Engineering and Science* 45(4),529-538,2005.
  - [5] Lee, S.Y., Shupe, T.F., Groom, L.R., and Hse, C.Y. Heterogeneous nucleation of asemicrystalline polymer on fiber surfaces In: *Recent Developments in wood composites*.91-97, 2006.
  - [6] Gasser, U., Weeks, E.R., Schofield, A., Pusey, P.N. and Weitz1, D.A. Real-space imaging of nucleation and growth in colloidal crystallization. *Science*. 292(5515), 258-262, 2001.
  - [7] Sawyer, W. G., Freudenberg, K. D., Bhimaraj, P., and Schadler, L. S. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles. *Wear*, 254(5), 573-580,2003.
  - [8] Zhu, K. and Schmauder, S.Prediction of the failure properties of short fiber reinforced composites with metal and polymer matrix. *Computational Materials Science*, 28(3), 743-748, 2003.
  - [9] Tavman, I.H., Thermal and mechanical properties of copper powder filled polyethylene composites. *Powder Technology*, 91(1), 63-67, 1997.
  - [10] Rothon, R.N. Mineral fillers in thermoplastics: filler manufacture. *Journal of Adhesion*, 64(1), 87-109, 1997.
  - [11] Rothon, R.N. Effects of particulate fillers on flame retardant properties of composites. *Advances in polymer science*, 139, 67-107,1999.
  - [12] Nielsen, L.E., Landel, R.F. Mechanical properties of polymers and composites. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 377-459,1993.
  - [13] Peters S.T. Handbook of composites.2nd ed. London: Chapman and Hall, 242- 243,1998.
  - [14] Young, R. J. and Beaumont, P. W. R. Failure of brittle polymers by slow crack growth. *Journal of Materials Science*, 12(4), 684-692,1977.
  - [15] Yamamoto I, Higashihara T, Kobayashi T. Effect of Silica-Particle Characteristics on Impact/Usual Fatigue Properties and Evaluation of Mechanical Characteristics of Silica-Particle Epoxy Resins. *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*. 46(2), 145-53, 2003.
  - [16] Nakamura, Y., Yamaguchi, M., Kitayama, A., Okubo, M., and Matsumoto, T. Effect of particle size on fracture toughness of epoxy resin filled with angular-shaped silica. *Polymer*, 32(12), 2221-2229, 1991.
  - [17] Nakamura, Y., Yamaguchi, M., Okubo, M., and Matsumoto, T. Effects of particle size on mechanical and impact properties of epoxy resin filled with spherical silica. *Journal of applied polymer science*, 45(7), 1281-1289, 1992.
  - [18] Kim, J. I., Kang, P. H., and Nho, Y. C. Positive temperature coefficient behaviour of polymer composites having a high melting temperature. *Journal of Applied Polymer Science*, 92(1), 394-401,2004.
  - [19] Nikkeshi, S., Kudo, M. and Masuko, T. Dynamic viscoelastic properties and thermal properties of Ni powder-epoxy resin composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 69(13), 2593-2598, 1998.
  - [20] Atagur M, Seki Y, Oncu O, Sever K, Seki Y, Sarikanat M, et al. Evaluating of reinforcing effect of *Ceratonia Siliqua* for polypropylene: Tensile, flexural and other properties. *Polym Test* 2020;89:106607. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106607>.
  - [21] Sarasini F, Tirillò J, Lampani L, Sasso M, Mancini E, Burgstaller C, et al. Static and dynamic characterization of agglomerated cork and related sandwich structures. *Compos Struct*

- 2019;212:439–51. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.054>.
- [22] Belaadi A, Bourchak M, Aouici H. Mechanical properties of vegetal yarn: Statistical approach. *Compos Part B Eng* 2016;106. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.033>.
- [23] Belaadi A, Amroune S, Bourchak M. Effect of eco-friendly chemical sodium bicarbonate treatment on the mechanical properties of flax fibres: Weibull statistics. *Int J Adv Manuf Technol* 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04628-8>.
- [24] Zhou Y, Fan M, Chen L. Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview. vol. 101. Elsevier Ltd; 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.055>.
- [25] Rajmohan T, Vinayagamoorthy R, Mohan K. Review on effect machining parameters on performance of natural fibre–reinforced composites (NFRCs). *J Thermoplast Compos Mater* 2019;32:1282–302. <https://doi.org/10.1177/0892705718796541>.
- [26] Babu J, Sunny T, Paul NA, Mohan KP, Philip J, Davim JP. Assessment of delamination in composite materials: A review. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2016;230:1990–2003. <https://doi.org/10.1177/0954405415619343>.
- [27] Chen W-C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *Int J Mach Tools Manuf* 1997;37:1097–108. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8).
- [28] Aravindh S, Umanath K. Delamination in drilling of natural Fibre Reinforced Polymer Composites produced by Compression moulding. *Appl Mech Mater* 2015;767:796–800. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767.796>.
- [29] Sridharan V, Muthukrishnan N. Optimization of machinability of polyester/modified jute fabric composite using grey relational analysis (GRA). *Procedia Eng* 2013;64:1003–12. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.177>.
- [30] Sridharan V, Raja T, Muthukrishnan N. Study of the Effect of Matrix , Fibre Treatment and Graphene on Delamination by Drilling Jute / Epoxy Nanohybrid Composite. *Arab J Sci Eng* 2016:10–4. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-2005-2>.
- [31] Yallem TB, Kumar P, Singh I. A study about hole making in woven jute fabric-reinforced polymer composites. *Proc IMechE Part L J Mater Des Appl* 2015;0:1–11. <https://doi.org/10.1177/1464420715587750>.
- [32] Vigneshwaran S, John KM, Deepak Joel Johnson R, Uthayakumar M, Arumugaprabu V, Kumaran ST. Conventional and unconventional machining performance of natural fibre-reinforced polymer composites: A review. *J Reinf Plast Compos* 2020. <https://doi.org/10.1177/0731684420958103>.
- [33] Mohan NS, Kulkarni SM, Ramachandra A. Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials. *J Mater Process Technol* 2007;186:265–71. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.12.043>.
- [34] Mudhukrishnan M, Hariharan P, Palanikumar K. Measurement and analysis of thrust force and delamination in drilling glass fiber reinforced polypropylene composites using different drills. *Meas J Int Meas Confed* 2020;149:106973. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106973>.
- [35] Fernández-Pérez J, Cantero JL, Díaz-Álvarez J, Miguélez MH. Influence of cutting parameters on tool wear and hole quality in composite aerospace components drilling. *Compos Struct* 2017;178:157–61. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.043>.
- [36] Feito N, Diaz-Álvarez J, López-Puente J, Miguelez MH. Numerical analysis of the influence of tool wear and special cutting geometry when drilling woven CFRPs. *Compos Struct* 2016;138:285–94. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.065>.
- [37] Rezghi Maleki H, Hamedi M, Kubouchi M, Arao Y. Experimental study on drilling of jute fiber reinforced polymer composites. *J Compos Mater* 2019;53:283–95.

- [38] Ramesh M, Palanikumar K, Reddy KH. Experimental investigation and analysis of machining characteristics in drilling hybrid glass-sisal-jute fiber reinforced polymer composites. 5th Int. 26th all india Manuf. Technol. Des. Res. Conf. AIMTDR, 2014.
- [39] Vinayagamorthy R, Rajeswari N, Karthikeyan S. Investigations of damages during drilling of natural sandwich composites. *Appl. Mech. Mater.*, vol. 766, Trans Tech Publ; 2015, p. 812–7.
- [40] Sreekala, M. S., Kumaran, M. G., & Thomas, S. (1997). Oil palm fibers: Morphology, chemical composition, surface modification, and mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 66(5), 821-835.
- [41] Belaadi A, Bourchak M, Aouici H (2016) Mechanical properties of vegetal yarn: statistical approach. *Compos Part B Eng* 106:139–153. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.033>
- [42] Saaidia A, Bezazi A, Belbah A, Bouchelaghem H, Scarpa F, Amirouche S (2017) Mechano-physical properties and statistical design of jute yarns. *Meas J Int Meas Confed* 111:284–294. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.054>
- [43] Standard A (2010) D2256/D2256M—1081, “Standard test method for tensile properties of yarns by the single—strand method”. ASTM International, West Conshohocken. [https://doi.org/10.1520/D2256\\_D2256M—10E01](https://doi.org/10.1520/D2256_D2256M—10E01)
- [44] Standard A (2014) D3039/D3039M-14. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania
- [45] ASTM D (2010) D790-10. Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania
- [46] A. Makhlof, A. Layachi, I. Kouadri, A. Belaadi, H. Satha, Structural study and thermal behavior of composites: Polyamide 66/glass fibers: The reinforcement ratio effect on the kinetics of crystallization, *J. Compos. Mater.* 54 (2020) 1467–1481. <https://doi.org/10.1177/0021998319883913>.
- [47] L. Segal, J.J. Creely, A.E. Martin, C.M. Conrad, An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer, *Text. Res. J.* 29 (1959) 786–794. <https://doi.org/10.1177/004051755902901003>.

---

### CHAPITRE III

---

- [1] Belaadi A, BourchakM, Aouici H (2016) Mechanical properties of vegetal yarn: statistical approach. *Compos Part B Eng* 106:139–153. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.033>
- [2] Saaidia A, Bezazi A, Belbah A, Bouchelaghem H, Scarpa F Amirouche S (2017) Mechano-physical properties and statistical design of jute yarns. *Meas J Int Meas Confed* 111:284–294. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.054>
- [3] Kim JT, Netravali AN (2011) Development of aligned-hemp yarn reinforced green composites with soy protein resin: effect of pH on mechanical and interfacial properties. *Compos Sci Technol* 71:541–547. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.01.004>
- [4] Blanchard J, Sobey AJ, Blake JIR (2016) Multi-scale investigation into the mechanical behaviour of flax in yarn, cloth and laminate form. *Compos Part B Eng* 84:228–235. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.086>
- [5] Codispoti R, Oliveira D V., Olivito RS, Lourenço P B, Figueiro R (2015) Mechanical performance

- of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry. *Compos Part B Eng* 77: 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.021>
- [6] Ma H, Li Y, Wang D (2014) Investigations of fiber twist on the mechanical properties of sisal fiber yarns and their composites. *J Reinf Plast Compos* 33:687–696. <https://doi.org/10.1177/0731684413520187>
- [7] Standard A (2014) D3039/D3039M-14. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania
- [8] Munikenche Gowda T, Naidu ACB, Chhaya R (1999) Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 30:277–284. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00157-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00157-2)
- [9] Sever K, Sarikanat M, Seki Y, Erkan G, Erdoğan ÜH, Erden S (2012) Surface treatments of jute fabric: the influence of surface characteristics on jute fabrics and mechanical properties of jute/polyester composites. *Ind Crops Prod* 35:22–30. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.05.020>
- [10] Jawaid M, Abdul Khalil HPS, Abu Bakar A (2011) Woven hybrid composites: Tensile and flexural properties of oil palm-woven jute fibres based epoxy composites. *Mater Sci Eng A* 528:5190–5195. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.047>
- [11] Laranjeira E, de Carvalho LH, de L. Silva SM, D’Almeida JRM (2006) Influence of fiber orientation on the mechanical properties of polyester/jute composites. *J Reinf Plast Compos* 25:1269–1278. <https://doi.org/10.1177/0731684406060577>
- [12] MIR A, Zitoune R, Collombet F, Bezzazi B (2009) Study of mechanical and thermomechanical properties of jute/epoxy composite laminate. *J Reinf Plast Compos* 29:1669–1680. <https://doi.org/10.1177/0731684409341672>
- [13] Mishra V, Biswas S (2013) Physical and mechanical properties of bi-directional jute fiber epoxy composites. *Procedia Eng* 51:561–566. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.079>
- [14] Espert, A., Vilaplana, F., & Karlsson, S. (2004). Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 35(11), 1267-1276.
- [15] Cao, Y., Shibata, S., & Fukumoto, I. (2006). Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fiber before and after alkali treatments. *Composites part A: Applied science and Manufacturing*, 37(3), 423- 429.
- [16] Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Liu, Y., Yang, G. C., & Zeng, H. M. (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal reinforced epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 61(10), 1437-1447.
- [17] Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibers. *Progress in polymer science*, 24(2), 221-274.
- [18] Kreže, T., Iskrač, S., Smole, M. S., Stana-Kleinschek, K., Strnad, S., & Fakin, D. (2005). Flax fibers sorption properties influenced by different pretreatment processes. *Journal of natural fibers*, 2(3), 25-37.
- [19] Khan, M. A., Hassan, M. M., & Drzal, L. T. (2005). Effect of 2-hydroxyethylmethacrylate (HEMA) on the mechanical and thermal properties of jute polycarbonate composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(1), 71-81.
- [20] A. Makhlof, A. Belaadi, S. Amroune, M. Bouchak, H. Satha, Elaboration and Characterization of Flax Fiber Reinforced High Density Polyethylene Biocomposite: Effect of the Heating Rate on Thermo-mechanical Properties, *J. Nat. Fibers.* (2020) 1–14. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848737>.
- [21] A. Arul Marcel Moshi, D. Ravindran, S.R. Sundara Bharathi, S.R. Padma, S. Indran, D. Divya,

Characterization of natural cellulosic fiber extracted from *Grewia damine* flowering plant's stem, *Int. J. Biol. Macromol.* 164 (2020) 1246–1255. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.225>.

- [22] Ahmed Belaadi and al, Mechanical characterization and optimization of delamination factor in drilling bidirectional jute fibre-reinforced polymer biocomposites, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06217-6>

---

## CHAPITRE IV

---

- [1] Atagur M, Seki Y, Oncu O, Sever K, Seki Y, Sarikanat M, et al. Evaluating of reinforcing effect of *Ceratonia Siliqua* for polypropylene: Tensile, flexural and other properties. *Polym Test* 2020;89:106607. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106607>.
- [2] Sarasini F, Tirillò J, Lampani L, Sasso M, Mancini E, Burgstaller C, et al. Static and dynamic characterization of agglomerated cork and related sandwich structures. *Compos Struct* 2019;212:439–51. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.054>.
- [3] Belaadi A, Bourchak M, Aouici H. Mechanical properties of vegetal yarn: Statistical approach. *Compos Part B Eng* 2016;106. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.033>.
- [4] Belaadi A, Amroune S, Bourchak M. Effect of eco-friendly chemical sodium bicarbonate treatment on the mechanical properties of flax fibres: Weibull statistics. *Int J Adv Manuf Technol* 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04628-8>.
- [5] Zhou Y, Fan M, Chen L. Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview. vol. 101. Elsevier Ltd; 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.055>.
- [6] Rajmohan T, Vinayagamoorthy R, Mohan K. Review on effect machining parameters on performance of natural fibre–reinforced composites (NFRCS). *J Thermoplast Compos Mater* 2019;32:1282–302. <https://doi.org/10.1177/0892705718796541>.
- [7] Dutta S, Kim NK, Das R, Bhattacharyya D. Effects of sample orientation on the fire reaction properties of natural fibre composites. *Compos Part B Eng* 2019;157:195–206. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.118>.
- [8] Merli R, Preziosi M, Acampora A, Lucchetti MC, Petrucci E. Recycled fibers in reinforced concrete: A systematic literature review. *J Clean Prod* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119207>.
- [9] Cherief M, Belaadi A, Bouakba M, Bourchak M, Meddour I. Behaviour of lignocellulosic fibre-reinforced cellular core under low-velocity impact loading: Taguchi method. *Int J Adv Manuf Technol* 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05393-9>.
- [10] Boumaaza M, Belaadi A, Bourchak M. The Effect of Alkaline Treatment on Mechanical Performance of Natural Fibers-reinforced Plaster: Optimization Using RSM. *J Nat Fibers* 2020. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1724236>.
- [11] Jaouadi M, M'sahli S, Sakli F. Optimization and Characterization of Pulp Extracted from the *Agave Americana* L. *Fibers. Text Res J* 2009;79:110–20. <https://doi.org/10.1177/0040517508090781>.
- [12] Bedjaoui A, Belaadi A, Amroune S, Madi B. Impact of surface treatment of flax fibers on tensile mechanical properties accompanied by a statistical study. *Int J Integr Eng* 2019;6:10–7.
- [13] Lotfi A, Li H, Dao DV. Analytical and experimental investigation of the parameters in drilling flax/poly(lactic acid) bio-composite laminates. *Int J Adv Manuf Technol* 2020;109:503–21. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05668-1>.
- [14] Benzannache N, Belaadi A, Boumaaza M, Bourchak M. Improving the mechanical performance of biocomposite plaster/ Washingtonian filifira fibres using the RSM method. *J Build Eng* 2021;33. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101840>.

- [15] Benzidane R, Sereir Z, Bennegadi ML, Doumalin P, Poilâne C. Morphology, static and fatigue behavior of a natural UD composite: The date palm petiole 'wood.' *Compos Struct* 2018;203:110–23. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.122>.
- [16] Djoudi T, Hecini M, Scida D, Djebloun Y. Physico-Mechanical Characterization of Composite Materials Based on Date Palm Tree Fibers Physico-Mechanical Characterization of Composite Materials Based on Date Palm Tree Fibers. *J Nat Fibers* 2019;0:1–14. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1658251>.
- [17] Mercy JL, Sivashankari P, Sangeetha M, Kavitha KR, Prakash S. Genetic Optimization of Machining Parameters Affecting Thrust Force during Drilling of Pineapple Fiber Composite Plates – an Experimental Approach. *J Nat Fibers* 2020:1–12. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1788484>.
- [18] Zhang H, Zhu P, Liu Z, Qi S, Zhu Y. Research on prediction method of mechanical properties of open-hole laminated plain woven CFRP composites considering drilling-induced delamination damage. *Mech Adv Mater Struct* 2020;0:1–16. <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1745969>.
- [19] Geng D, Liu Y, Shao Z, Lu Z, Cai J, Li X, et al. Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review. *Compos Struct* 2019;216:168–86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.099>.
- [20] Belaadi A, Laouici H, Bourchak M. Mechanical and drilling performance of short jute fibre-reinforced polymer biocomposites: statistical approach. *Int J Adv Manuf Technol* 2020;106:1989–2006. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04761-4>.
- [21] Jayabal S, Natarajan U. Drilling analysis of coir – fibre-reinforced polyester composites. *Bull Mater Sci* 2011;34:1563–7. <https://doi.org/doi.org/10.1007/s12034-011-0359-y>.
- [22] Durão LMP, Gonçalves DJS, Tavares JMRS, De Albuquerque VHC, Panzera TH, Silva LJ, et al. Drilling delamination outcomes on glass and sisal reinforced plastics. *Mater Sci Forum* 2013;730–732:301–6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.301>.
- [23] Çelik YH, Alp MS. Determination of Milling Performance of Jute and Flax Fiber Reinforced Composites. *J Nat Fibers* 2020:1–15. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1764435>.
- [24] Vinayagamoorthy R. Analysis of cutting forces during milling of natural fibered composites using Fuzzy logic. *Int J Compos Mater Manuf* 2012.
- [25] Chegiani F, El M, Chebbi A. Cutting behavior of flax fibers as reinforcement of biocomposite structures involving multiscale hygrometric shear. *Compos Part B* 2021;211:108660. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108660>.
- [26] Díaz-Álvarez A, Díaz-Álvarez J, Cantero JL, Santiuste C. Analysis of orthogonal cutting of biocomposites. *Compos Struct* 2020;234:111734. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111734>.
- [27] Chandramohan D, Rajesh S. STUDY OF MACHINING PARAMETERS ON NATURAL FIBER PARTICLE REINFORCED POLYMER COMPOSITE MATERIAL. *Acad J Manuf Eng* 2014;12.
- [28] Rezghi Maleki H, Hamedi M, Kubouchi M, Arao Y. Experimental investigation on drilling of natural flax fiber-reinforced composites. *Mater Manuf Process* 2019;34:283–92. <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1532584>.
- [29] Nasir AAA, Azmi AI, Khalil ANM. Parametric Study on the Residual Tensile Strength of Flax Natural Fibre Composites after Drilling Operation. *Procedia Manuf* 2015;2:97–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.017>.
- [30] Bajpai PK, Singh I. Drilling behavior of sisal fiber-reinforced polypropylene composite laminates. *J Reinf Plast Compos* 2013;32:1569–1576. <https://doi.org/10.1177/0731684413492866>.
- [31] Bajpai PK, Debnath K, Singh I. Hole making in natural polylactic acid laminates : An experimental investigation. *J Thermoplast Compos Mater* 2015;30:1–17.

<https://doi.org/10.1177/0892705715575094>.

- [32] Davim JP, Reis P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study. *Mater Des* 2003;24:315–24. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00062-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00062-1).
- [33] Chaudhary V, Gohil PP. Investigations on Drilling of Bidirectional Cotton Polyester Composite. *Mater Manuf Process* 2016;31:960–8. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1059444>.
- [34] Athijayamani A, Thiruchitrabalam M, Natarajan U, Pazhanivel B. Influence of alkali-treated fibers on the mechanical properties and machinability of roselle and sisal fiber hybrid polyester composite. *Polym Compos* 2010;31:723–31. <https://doi.org/10.1002/pc.20853>.
- [35] Venkateshwaran N, ElayaPerumal A. Hole quality evaluation of natural fiber composite using image analysis technique. *J Reinf Plast Compos* 2013;32:1188–97. <https://doi.org/10.1177/0731684413486847>.
- [36] Ismail SO, Dhakal HN, Dimla E, Beaugrand J, Popov I. Effects of drilling parameters and aspect ratios on delamination and surface roughness of lignocellulosic HFRP composite laminates. *J Appl Polym Sci* 2016;133. <https://doi.org/10.1002/app.42879>.
- [37] Abilash N, Sivapragash M. Optimizing the delamination failure in bamboo fiber reinforced polyester composite. *J King Saud Univ - Eng Sci* 2016;28:92–102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.09.004>.
- [38] Parthipan N, Ilangkumaran M, Maridurai T, Prasanna SC. Effect of Silane Treated Silicon (IV) Oxide Nanoparticle Addition on Mechanical, Impact Damage and Drilling Characteristics of Kenaf Fibre-Reinforced Epoxy Composite. *Silicon* 2020;12:459–67. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00138-0>.
- [39] Belaadi A, Boumaaza M, Amroune S, Bourchak M. Mechanical characterization and optimization of delamination factor in drilling bidirectional jute fibre-reinforced polymer biocomposites. *Int J Adv Manuf Technol* 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06217-6>.
- [40] Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, Response surface methodology. Process and product optimization using designed experiments, 1995.
- [41] Chabbi, A., et al. "Modeling and optimization of turning process parameters during the cutting of polymer (POM C) based on RSM, ANN, and DF methods." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017; 91: 2267-2290.
- [42] KARAM, Sandrine. Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt. Limoges University, 2004.
- [43] ETSINDA MF, Nouvelle approche hybride d'optimisation multi-objective basée sur la méthode des surfaces de réponse et le système de colonies de fourmis, Comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie de la production automatisée M. Ing, Université du QUÉBEC, 2008.
- [44] Myers RH, Montgomery DC, Response Surface Methodology, 2nd Ed., WILEY C SONS (Éditeurs), New York, NY, USA, 2002.
- [45] GLÈLÈ KAKAÏ, R., SODJINOÛ, E., et FONTON, N. Conditions d'application des méthodes statistiques paramétriques : application sur ordinateur. Bibliothèque Nationale, Bénin, 2006.
- [46] Gained VN, Karnik SR, Faustino M, Davim JP, Machinability analysis in turning tungsten-copper composite for application in EDM electrodes, *Int J Refract Metals hard Mater*, Vol. 27, pp. 754-63, 2009.
- [47] Babu J, Sunny T, Paul NA, Mohan KP, Philip J, Davim JP. Assessment of delamination in composite materials: A review. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2016;230:1990–2003. <https://doi.org/10.1177/0954405415619343>.
- [48] Feito N, Diaz-Álvarez J, López-Puente J, Miguelez MH. Numerical analysis of the influence of tool

wear and special cutting geometry when drilling woven CFRPs. *Compos Struct* 2016;138:285–94. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.065>.

- [49] Debnath K, Sisodia M, Kumar A, Singh I. Damage-Free Hole Making in Fiber-Reinforced Composites: An Innovative Tool Design Approach. *Mater Manuf Process* 2016;31:1400–8. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1140191>.

---

## CHAPITRE V

---

- [1] Atagur M, Seki Y, Oncu O, Sever K, Seki Y, Sarikanat M, et al. Evaluating of reinforcing effect of *Ceratonia Siliqua* for polypropylene: Tensile, flexural and other properties. *Polym Test* 2020;89:106607. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106607>.
- [2] Sarasini F, Tirillò J, Lampani L, Sasso M, Mancini E, Burgstaller C, et al. Static and dynamic characterization of agglomerated cork and related sandwich structures. *Compos Struct* 2019;212:439–51. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.054>.
- [3] Belaadi A, Bourchak M, Aouici H. Mechanical properties of vegetal yarn: Statistical approach. *Compos Part B Eng* 2016;106. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.033>.
- [4] Belaadi A, Amroune S, Bourchak M. Effect of eco-friendly chemical sodium bicarbonate treatment on the mechanical properties of flax fibres: Weibull statistics. *Int J Adv Manuf Technol* 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04628-8>.
- [5] Zhou Y, Fan M, Chen L. Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview. vol. 101. Elsevier Ltd; 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.055>.
- [6] Rajmohan T, Vinayagamoorthy R, Mohan K. Review on effect machining parameters on performance of natural fibre-reinforced composites (NFRCs). *J Thermoplast Compos Mater* 2019;32:1282–302. <https://doi.org/10.1177/0892705718796541>.
- [7] Dutta S, Kim NK, Das R, Bhattacharyya D. Effects of sample orientation on the fire reaction properties of natural fibre composites. *Compos Part B Eng* 2019;157:195–206. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.118>.
- [8] Merli R, Preziosi M, Acampora A, Lucchetti MC, Petrucci E. Recycled fibers in reinforced concrete: A systematic literature review. *J Clean Prod* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119207>.
- [9] Cherief M, Belaadi A, Bouakba M, Bourchak M, Meddour I. Behaviour of lignocellulosic fibre-reinforced cellular core under low-velocity impact loading: Taguchi method. *Int J Adv Manuf Technol* 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05393-9>.
- [10] Boumaaza M, Belaadi A, Bourchak M. The Effect of Alkaline Treatment on Mechanical Performance of Natural Fibers-reinforced Plaster: Optimization Using RSM. *J Nat Fibers* 2020. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1724236>.
- [11] Jaouadi M, M'sahli S, Sakli F. Optimization and Characterization of Pulp Extracted from the Agave Americana L. *Fibers. Text Res J* 2009;79:110–20. <https://doi.org/10.1177/0040517508090781>.
- [12] Bedjaoui A, Belaadi A, Amroune S, Madi B. Impact of surface treatment of flax fibers on tensile mechanical properties accompanied by a statistical study. *Int J Integr Eng* 2019;6:10–7.
- [13] Lotfi A, Li H, Dao DV. Effect of Drilling Parameters on Delamination and Hole Quality in Drilling Flax Fiber Reinforced Bio-Composites BT - Sustainable Design and Manufacturing 2018. In: Dao D, Howlett RJ, Setchi R, Vlacic L, editors., Cham: Springer International Publishing; 2019, p. 71–81.

- [14] Lotfi A, Li H, Dao DV. Analytical and experimental investigation of the parameters in drilling flax/poly(lactic acid) bio-composite laminates. *Int J Adv Manuf Technol* 2020;109:503–21. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05668-1>.
- [15] Benzannache N, Belaadi A, Boumaaza M, Bourchak M. Improving the mechanical performance of biocomposite plaster/ Washingtonian filifira fibres using the RSM method. *J Build Eng* 2021;33. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101840>.
- [16] Benzidane R, Sereir Z, Bennegadi ML, Doumalin P, Poilâne C. Morphology, static and fatigue behavior of a natural UD composite: The date palm petiole ‘wood.’ *Compos Struct* 2018;203:110–23. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.122>.
- [17] Djoudi T, Hecini M, Scida D, Djebloun Y. Physico-Mechanical Characterization of Composite Materials Based on Date Palm Tree Fibers Physico-Mechanical Characterization of Composite Materials Based on Date Palm Tree Fibers. *J Nat Fibers* 2019;0:1–14. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1658251>.
- [18] Mercy JL, Sivashankari P, Sangeetha M, Kavitha KR, Prakash S. Genetic Optimization of Machining Parameters Affecting Thrust Force during Drilling of Pineapple Fiber Composite Plates – an Experimental Approach. *J Nat Fibers* 2020:1–12. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1788484>.
- [19] Zhang H, Zhu P, Liu Z, Qi S, Zhu Y. Research on prediction method of mechanical properties of open-hole laminated plain woven CFRP composites considering drilling-induced delamination damage. *Mech Adv Mater Struct* 2020;0:1–16. <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1745969>.
- [20] Feito N, Díaz-Álvarez J, López-Puente J, Miguelez MH. Experimental and numerical analysis of step drill bit performance when drilling woven CFRPs. *Compos Struct* 2018;184:1147–55. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.061>.
- [21] Fernández-Pérez J, Cantero JL, Díaz-Álvarez J, Miguélez MH. Influence of cutting parameters on tool wear and hole quality in composite aerospace components drilling. *Compos Struct* 2017;178:157–61. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.043>.
- [22] Feito N, Diaz-Álvarez J, López-Puente J, Miguelez MH. Numerical analysis of the influence of tool wear and special cutting geometry when drilling woven CFRPs. *Compos Struct* 2016;138:285–94. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.065>.
- [23] Feito N, Diaz-Álvarez A, Cantero JL, Rodríguez-Millán M, Miguélez H. Experimental analysis of special tool geometries when drilling woven and multidirectional CFRPs. *J Reinf Plast Compos* 2016;35:33–55. <https://doi.org/10.1177/0731684415612931>.
- [24] Díaz-Álvarez J, Olmedo A, Santiuste C, Miguélez MH. Theoretical estimation of thermal effects in drilling of woven carbon fiber composite. *Materials (Basel)* 2014;7:4442–54. <https://doi.org/10.3390/ma7064442>.
- [25] Díaz-Álvarez A, Rodríguez-Millán M, Díaz-Álvarez J, Miguélez MH. Experimental analysis of drilling induced damage in aramid composites. *Compos Struct* 2018;202:1136–44. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.068>.
- [26] Bayraktar Ş, Turgut Y. Determination of delamination in drilling of carbon fiber reinforced carbon matrix composites/Al 6013-T651 stacks. *Measurement* 2020;154:107493. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107493>.
- [27] Geng D, Liu Y, Shao Z, Lu Z, Cai J, Li X, et al. Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review. *Compos Struct* 2019;216:168–86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.099>.
- [28] Belaadi A, Laouici H, Bourchak M. Mechanical and drilling performance of short jute fibre-reinforced polymer biocomposites: statistical approach. *Int J Adv Manuf Technol* 2020;106:1989–2006. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04761-4>.

- [29] Chaitanya S, Singh I. Ecofriendly treatment of aloe vera fibers for PLA based green composites. *Int J Precis Eng Manuf - Green Technol* 2018;5:143–50. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0015-8>.
- [30] Bajpai PK, Singh I. Drilling behavior of sisal fiber-reinforced polypropylene composite laminates. *J Reinf Plast Compos* 2013;32:1569–1576. <https://doi.org/10.1177/0731684413492866>.
- [31] Bajpai PK, Debnath K, Singh I. Hole making in natural polylactic acid laminates : An experimental investigation. *J Thermoplast Compos Mater* 2015;30:1–17. <https://doi.org/10.1177/0892705715575094>.
- [32] Debnath K, Sisodia M, Kumar A, Singh I. Damage-Free Hole Making in Fiber-Reinforced Composites: An Innovative Tool Design Approach. *Mater Manuf Process* 2016;31:1400–8. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1140191>.
- [33] Debnath K, Singh I, Dvivedi A. Drilling Characteristics of Sisal Fiber-Reinforced Epoxy and Polypropylene Composites. *Mater Manuf Process* 2014;29:1401–9. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.941870>.
- [34] Debnath K, Singh I, Dvivedi A. On the analysis of force during secondary processing of natural fiber-reinforced composite laminates. *Polym Compos* 2017;38:164–74. <https://doi.org/10.1002/pc.23572>.
- [35] Chaudhary V, Gohil PP. Investigations on Drilling of Bidirectional Cotton Polyester Composite. *Mater Manuf Process* 2016;31:960–8. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1059444>.
- [36] Venkateshwaran N, ElayaPerumal A. Hole quality evaluation of natural fiber composite using image analysis technique. *J Reinf Plast Compos* 2013;32:1188–97. <https://doi.org/10.1177/0731684413486847>.
- [37] Athijayamani A, Thiruchitrabalam M, Natarajan U, Pazhanivel B. Influence of alkali-treated fibers on the mechanical properties and machinability of roselle and sisal fiber hybrid polyester composite. *Polym Compos* 2010;31:723–31. <https://doi.org/10.1002/pc.20853>.
- [38] Ramesh M, Sri Ananda Atreya T, Aswin US, Eashwar H, Deepa C. Processing and mechanical property evaluation of banana fiber reinforced polymer composites. *Procedia Eng* 2014;97:563–72. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.284>.
- [39] Ismail SO, Dhakal HN, Dimla E, Beaugrand J, Popov I. Effects of drilling parameters and aspect ratios on delamination and surface roughness of lignocellulosic HFRP composite laminates. *J Appl Polym Sci* 2016;133. <https://doi.org/10.1002/app.42879>.
- [40] De Oliveira LÁ, Santos JC Dos, Panzera TH, Freire RTS, Vieira LMG, Rubio JCC. Investigations on short coir fibre-reinforced composites via full factorial design. *Polym Polym Compos* 2018;26:391–9. <https://doi.org/10.1177/0967391118806144>.
- [41] Abilash N, Sivapragash M. Optimizing the delamination failure in bamboo fiber reinforced polyester composite. *J King Saud Univ - Eng Sci* 2016;28:92–102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.09.004>.
- [42] Díaz-Álvarez A, Díaz-Álvarez J, Santiuste C, Miguélez MH. Experimental and numerical analysis of the influence of drill point angle when drilling biocomposites. *Compos Struct* 2019;209:700–9. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.018>.
- [43] Babu GD, Babu KS, Gowd BUM. Effects of drilling parameters on delamination of hemp fiber reinforced composites. *Int J Mech Eng Res Dev* 2012;2:1–8.
- [44] Azuan SAS. Effects of Drilling Parameters on Delamination of Coconut Meat Husk Reinforced Polyester Composites. *Adv Environ Biol* 2013;7:1097–100. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-38345-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38345-8_6).
- [45] Roy Choudhury M, Srinivas MS, Debnath K. Experimental investigations on drilling of lignocellulosic fiber reinforced composite laminates. *J Manuf Process* 2018;34:51–61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.032>.

- [46] Belaadi A, Boumaaza M, Amroune S, Bourchak M. Mechanical characterization and optimization of delamination factor in drilling bidirectional jute fibre-reinforced polymer biocomposites. *Int J Adv Manuf Technol* 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06217-6>.
- [47] Rao YS, Mohan NS, Shetty N, Shivamurthy B. Drilling and structural property study of multi-layered fiber and fabric reinforced polymer composite - a review. *Mater Manuf Process* 2019;34:1549–79. <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1686522>.
- [48] Azuan SAS, Juraidi JM, Muhamad WMW. Evaluation of Delamination in Drilling Rice Husk Reinforced Polyester Composites. *Appl Mech Mater* 2012;232:106–10. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.232.106>.
- [49] Aravindh S, Umanath K. Delamination in drilling of natural Fibre Reinforced Polymer Composites produced by Compression moulding. *Appl Mech Mater* 2015;767:796–800. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767.796>.
- [50] Sridharan V, Muthukrishnan N. Optimization of machinability of polyester/modified jute fabric composite using grey relational analysis (GRA). *Procedia Eng* 2013;64:1003–12. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.177>.
- [51] Sridharan V, Raja T, Muthukrishnan N. Study of the Effect of Matrix , Fibre Treatment and Graphene on Delamination by Drilling Jute / Epoxy Nanohybrid Composite. *Arab J Sci Eng* 2016:10–4. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-2005-2>.
- [52] Yallem TB, Kumar P, Singh I. A study about hole making in woven jute fabric-reinforced polymer composites. *Proc IMechE Part L J Mater Des Appl* 2015;0:1–11. <https://doi.org/10.1177/1464420715587750>.
- [53] Monteiro SN, Terrones LAH, D’Almeida JRM. Mechanical performance of coir fiber/polyester composites. *Polym Test* 2008;27:591–5. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.03.003>.
- [54] Jayabal S, Natarajan U. Drilling analysis of coir – fibre-reinforced polyester composites. *Bull Mater Sci* 2011;34:1563–7. <https://doi.org/doi.org/10.1007/s12034-011-0359-y>.
- [55] Durão LMP, Gonçalves DJS, Tavares JMRS, De Albuquerque VHC, Panzera TH, Silva LJ, et al. Drilling delamination outcomes on glass and sisal reinforced plastics. *Mater Sci Forum* 2013;730–732:301–6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.301>.
- [56] Çelik YH, Alp MS. Determination of Milling Performance of Jute and Flax Fiber Reinforced Composites. *J Nat Fibers* 2020:1–15. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1764435>.
- [57] Vinayagamorthy R. Analysis of cutting forces during milling of natural fibered composites using Fuzzy logic. *Int J Compos Mater Manuf* 2012.
- [58] Chegiani F, El M, Chebbi A. Cutting behavior of flax fibers as reinforcement of biocomposite structures involving multiscale hygrometric shear. *Compos Part B* 2021;211:108660. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108660>.
- [59] Díaz-Álvarez A, Díaz-Álvarez J, Cantero JL, Santiuste C. Analysis of orthogonal cutting of biocomposites. *Compos Struct* 2020;234:111734. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111734>.
- [60] Chandramohan D, Rajesh S. STUDY OF MACHINING PARAMETERS ON NATURAL FIBER PARTICLE REINFORCED POLYMER COMPOSITE MATERIAL. *Acad J Manuf Eng* 2014;12.
- [61] Rezaghi Maleki H, Hamedi M, Kubouchi M, Arao Y. Experimental investigation on drilling of natural flax fiber-reinforced composites. *Mater Manuf Process* 2019;34:283–92. <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1532584>.
- [62] Nasir AAA, Azmi AI, Khalil ANM. Parametric Study on the Residual Tensile Strength of Flax Natural Fibre Composites after Drilling Operation. *Procedia Manuf* 2015;2:97–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.017>.
- [63] Davim JP, Reis P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—

- experimental and statistical study. *Mater Des* 2003;24:315–24. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00062-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00062-1).
- [64] Parthipan N, Ilangkumaran M, Maridurai T, Prasanna SC. Effect of Silane Treated Silicon (IV) Oxide Nanoparticle Addition on Mechanical, Impact Damage and Drilling Characteristics of Kenaf Fibre-Reinforced Epoxy Composite. *Silicon* 2020;12:459–67. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00138-0>.
- [65] Babu J, Sunny T, Paul NA, Mohan KP, Philip J, Davim JP. Assessment of delamination in composite materials: A review. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2016;230:1990–2003. <https://doi.org/10.1177/0954405415619343>.
- [66] Vigneshwaran S, John KM, Deepak Joel Johnson R, Uthayakumar M, Arumugaprabu V, Kumaran ST. Conventional and unconventional machining performance of natural fibre-reinforced polymer composites: A review. *J Reinf Plast Compos* 2020. <https://doi.org/10.1177/0731684420958103>.
- [67] Mohan NS, Kulkarni SM, Ramachandra A. Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials. *J Mater Process Technol* 2007;186:265–71. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.12.043>.
- [68] Mudhukrishnan M, Hariharan P, Palanikumar K. Measurement and analysis of thrust force and delamination in drilling glass fiber reinforced polypropylene composites using different drills. *Meas J Int Meas Confed* 2020;149:106973. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106973>.
- [69] Chen W-C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *Int J Mach Tools Manuf* 1997;37:1097–108. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8).
- [70] Rezghi Maleki H, Hamed M, Kubouchi M, Arao Y. Experimental study on drilling of jute fiber reinforced polymer composites. *J Compos Mater* 2019;53:283–95.
- [71] Ramesh M, Palanikumar K, Reddy KH. Experimental investigation and analysis of machining characteristics in drilling hybrid glass-sisal-jute fiber reinforced polymer composites. 5th Int. 26th all india Manuf. Technol. Des. Res. Conf. AIMTDR, 2014.
- [72] Vinayagamoorthy R, Rajeswari N, Karthikeyan S. Investigations of damages during drilling of natural sandwich composites. *Appl. Mech. Mater.*, vol. 766, Trans Tech Publ; 2015, p. 812–7.
- [73] Vinayagamoorthy R, Rajeswari N, Sivanarasimha S, Balasubramanian K. Fuzzy based optimization of thrust force and torque during drilling of natural hybrid composites. *Appl. Mech. Mater.*, vol. 787, Trans Tech Publ; 2015, p. 265–9.
- [74] Ramnath BV, Sharavanan S, Jeykrishnan J. Optimization of process parameters in drilling of fibre hybrid composite using Taguchi and grey relational analysis. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 183, IOP Publishing; 2017, p. 12003.
- [75] Vinayagamoorthy R. Parametric optimization studies on drilling of sandwich composites using the Box–Behnken design. *Mater Manuf Process* 2017;32:645–53. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1232811>.
- [76] Pailoor S, Murthy HNN, Sreenivasa TN. Drilling of In-Line Compression Molded Jute / Polypropylene Composites. *J Nat Fibers* 2021;18:91–104. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1612309>.
- [77] Çelik YH, Alp MS. Determination of Milling Performance of Jute and Flax Fiber Reinforced Composites. *J Nat Fibers* 2020;00:1–15. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1764435>.
- [78] Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, Response surface methodology. Process and product optimization using designed experiments, 1995.
- [79] Chabbi, A., et al. "Modeling and optimization of turning process parameters during the cutting of polymer (POM C) based on RSM, ANN, and DF methods." *The International Journal of*

Advanced Manufacturing Technology 2017; 91: 2267-2290.

- [80] KARAM, Sandrine. Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt. Limoges University, 2004.