

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 : **D012122001D**

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Spécialité : Génie Mécanique

Par :

Mr. TABET ZOHIR

**Élaboration et caractérisation d'agromatériaux biosandwiches à
base de constituants biologiques**

Soutenue le : **26/06/2022**

Devant le Jury composé par :

Président	LEGOUERA Messaoud	Professeur	Université de Skikda
Encadreur	BELAADI Ahmad	MCA	Université de Skikda
Examineur	LAOUICI Hamdi	Professeur	ENST Alger
Examineur	BEDJAOUI Azzedine	MCA	Université de Skikda
Examineur	DIB Amar	MCA	Université de Annaba
Examineur	MAKHLOUF Azzedine	MCA	Université de Khenchela

Année universitaire

2021/2022

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes parents

Ma femme et mes enfants

A mes frères et ma sœur

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

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

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.4 Traitement à l'organosilane	16
I.5 Traitement d'estérification.....	17
I.5.1 Réaction d'acétylation.....	17
I.6 Compositions chimiques et propriétés physiques des fibres naturelles	19
I.6.1 Cellulose	19
I.6.2 Hémicellulose	20
I.6.3 Lignine	21
I.6.4 Autres composants.....	21
I.7 Modifications de la surface des fibres naturelles.....	21
I.8 Composites/Biocomposites.....	22
I.8.1 Composites renforcés par des fibres naturelles	23
I.8.2 Composites à matrice polymère (CMP).....	23
I.8.3 Avantages de l'utilisation de composites à base de fibres naturelles	24
I.9 Techniques de fabrication de biocomposites.....	26
I.9.1 Technique de moulage ouvert.....	26
I.9.1.1 Pose à la main ou pose au pistolet	26
I.9.2 Technique de moulage fermé	27
I.9.2.1 Moulage par centrifugation.....	27
I.9.2.2 Moulage par compression.....	28
I.9.2.3 Vacuum Infusion.....	29
I.9.2.4 Moulage par transfert de résine (Resin Transfer Moulding-RTM)	31
I.9.2.5 Le moulage par injection	32
I.9.2.6 Extrusion	33
I.10 Usinage des biocomposites	34
I.10.1 Techniques de perçage.....	35
I.10.1.1 Perçage mécanique conventionnel	36
I.10.1.2 Méthodes de perçage non conventionnelles	36
I.10.2 Paramètres du perçage	38
I.10.3 Mesures des paramètres de performance du perçage	39
I.10.3.1 Délaminage	39
I.11 Conclusion	44
I.12 Références.....	45

CHAPITRE II

CONCEPTS FONDAMENTAUX EN STATISTIQUE ET ANALYSE DE DONNEES : METHODES D'ANALYSES RSM ET ANN

Résumé.....	55
II.1 Les principes généraux	56
II.1.1 La méthode des surfaces de réponse	56
II.1.1.1 Étapes de la méthodologie de surface de réponse	56
II.1.1.2 Les étapes de la RSM	57
II.1.1.2.1 Planification expérimentale	57
II.1.1.2.2 Modélisation	59
II.1.1.2.3 Validation des modèles	60
II.1.1.2.4 Terminologies à connaître.....	63
II.1.2 Réseaux de Neurones Artificiels.....	64
II.1.2.1 Composition d'un neurone.....	66
II.1.2.2 Architecture d'un réseau.....	67
II.1.2.3 L'apprentissage	70
II.1.2.4 Quelques modèles de réseau de neurone.....	70
II.1.2.4.1 Les réseaux de neurones monocouches.....	70
II.1.2.4.2 Les réseaux multicouches.....	71
II.1.2.5 Les conditions d'utilisation des réseaux de neurones	73
II.1.2.6 Les avantages et limites des réseaux de neurones.....	74
II.2 Conclusion	75
II.3 References.....	76

CHAPITRE III

ELABORATION DE MATERIAUX BIOSANDWICHES EN FIBRES DE JUTE/EPOXY A AME EN AGGLOMERES DE LIEGE

III.1 Introduction	77
III.2 Les constituants d'un matériau biosandwich	78
III.3 Présentation des matériaux étudiés.....	78
III.3.1 Peaux.....	79
III.3.1.1 Renforts (Fibres de Jute)	79
III.3.1.2 Matrices (résines époxy)	82
III.3.2 Matériau âme (liège)	83
III.4 Essais spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)	84
III.4.1 Essai de FTIR sur les fibres de jute.....	84
III.4.2 Essai de FTIR sur la résine époxy	85
III.4.3 Essai de FTIR sur le liège.....	87

III.5 Fabrication du biosandwiché	88
III.6 Essais Profilomètre 3D.....	92
III.7 Conclusion	98
III.8 Références.....	99

CHAPITRE IV

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

Résumé.....	101
IV.1 Introduction	102
IV.2 Méthodes et techniques expérimentale.....	104
IV.2.1 Procédure expérimentale de perçage.....	104
IV.3 Résultats et discussion	107
IV.3.1 Influence des paramètres de perçage sur le facteur de délaminage	107
IV.3.2 Méthodologie de surface de réponse et ANOVA pour le facteur de délamination	108
IV.3.3 Tracés de surface 3D pour le facteur de délamination	113
IV.3.4 Optimisation des réponses	120
IV.4 Conclusion.....	125
IV.5 Références	126

CHAPITRE V

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

Résumé.....	131
V.1 Introduction	132
V.2 Méthodes et techniques expérimentale.....	135
V.3 Résultats et discussion	135
V.3.1 Prédiction du facteur de délamination par le modèle ANN	135
V.3.2 Comparaison des modèles RSM et ANN	143
V.4 Conclusion.....	145
V.5 Références	147
Conclusion générale et perspectives.....	151

V. ANNEXE

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 Classification des fibres textile (naturelles et synthétiques)	5
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 [29,33,35]	8
Figure I-3 Réaction proposée pour le traitement alcalin des fibres lignocellulosiques.....	13
Figure I-4 a et b Fibres de lin non traitées, c et d Fibres de lin traitées avec une solution de NaOH à 10%, e et f Fibres de lin traitées avec une solution de NaOH à 30% [39]	15
Figure I-5 Images MEB de : (a) CF non traitée, (b) CF traitée par NaOH, (c) CF traitée par silane, (d) CF traitée par Ca(OH) ₂ , (e) PALF non traitée, (f) PALF traitée par NaOH, (g) PALF traitée par silane, (h) PALF traitée par Ca(OH) ₂ [43]	16
Figure I-6 Images MEB des surfaces cryofracturées de biocomposites PLA/ RSF non traités (micrographies à gauche) et de biocomposites PLA/ RSF acétylés (micrographies à droite) contenant 6 phr de PEG à une charge de: a et b 10 phr, c et d 20 phr, e et f 30 phr [37]	18
Figure I-7 Micrographies MEB de : a et c biocomposites fibre d'agave/PLA non traités (UFBC), b et d biocomposites fibre d'agave/PLA traités (TFBC) à une charge de fibre fixe de 20 % en poids. Reproduit avec la permission de [48]	20
Figure I-8 Procédé de stratification à la main (Schéma simplifié du procédé de moulage au contact : 1 moule, 2 agent de démoulage, 3 revêtement en gel, 4 résine avec fibres, 5 rouleau ébulleur, 6 matériau composite) [138]	27
Figure I-9 Procédé de coulée par centrifugation [140]	28
Figure I-10 Procédé de moulage par compression [139,141]	29
Figure I-11 Procédé d'infusion sous vide [139,141]	31
Figure I-12 Procédé de moulage par transfert de résine mis au point par Gong et al. [146].....	32
Figure I-13 Procédé de moulage par injection [139].....	33
Figure I-14 Procédé d'extrusion [148]	34
Figure I-15 (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), [171]	39
Figure I-16 (a) buse d'injection de l'AWJ, les caractéristiques de section ou la géométrie interne de la buse, le mélange de l'eau et de l'abrasif pour l'action de perçage, (b) les effets de la vitesse de déplacement de l'AWJ sur les dommages causés par la délamination (c) sur la rugosité de surface. [174]	41
Figure I-17 quelques types des zones endommagées lors du perçage de l'UT-JFRP (a, c) entrée, et (b, d) sortie [182]	42
Figure II-1 Etapes de la méthodologie de surface de réponse.....	56
Figure II-2 Une représentation graphique de la conception composite centrale	58
Figure II-3 Une représentation graphique de la conception de Box-Behnken.....	58
Figure II-4 Schéma d'un neurone biologique [7]	65
Figure II-5 Modèle d'un neurone artificiel	66
Figure II-6 Couche de S neurones	68
Figure II-7 Réseau de neurones de trois couches	69
Figure II-8 Mise en place d'un modèle prédictif par les réseaux de neurones	69
Figure II-9 Perceptron simple	71
Figure II-10 Perceptron multicouche	72

Figure III-1 Structure d'une plante et fibre de jute	80
Figure III-2 Vue générale de la machine FTIR model INVENIO-R (329)	84
Figure III-3 Échantillons Y (fibres de jute)	84
Figure III-4 Spectre FTIR de la fibre de jute	85
Figure III-5 Échantillons Y30 (résine époxy)	85
Figure III-6 Spectre FTIR de la résine époxy	86
Figure III-7 Échantillons COR (liège)	87
Figure III-8 Spectre FTIR du liège	88
Figure III-9 Renfort « toile de jute »	88
Figure III-10 Matrice « résine époxy, durcisseur et accélérateur »	89
Figure III-11 Ame « plaque de liège »	89
Figure III-12 Moule	90
Figure III-13 Produit finale « biosandwich jute/époxy/liège »	91
Figure III-14 Vue générale de la machine PROFILOMETRE 3D model Altisurf 520	92
Figure III-15 Échantillons du 3 trous (Biosandwiches jute/époxy/liège)	92
Figure III-16 Le profil des surfaces en 2D de les échantillons : (a) trou n°1, (b) trou n°2 et (c) trou n°3	93
Figure III-17 Vu 3D de la rugosité de surface de l'échantillon : (a) trou n°1, (b) trou n°2 et (c) trou n°3	95
Figure III-18 profile mesure represente par une courbe de hauteur z en fonction de la position x de l'échantillon : (a) trou n°1, (b) trou n°2 et (c) trou n°3	96
Figure IV-1 Disposition schématique du perçage de la structure du biosandwich.....	105
Figure IV-2 Trous typiques percés sur une plaque biosandwich jute/liège/époxy (a) entrée (b) section transversale et (c) sortie de délamination pour trois essais (#4, #13 et #22).	108
Figure IV-3 (a,b) Valeurs prédites par rapport aux valeurs réelles et (c,d) Distribution de probabilité normale des résidus F_d pour les différents forets utilisés dans ce travail.	112
Figure IV-4 (a,b) Représentation des surfaces de réponse des données F_d avec le foret HSS-TiN : (a) Vitesse d'avance en fonction du diamètre du foret, (b) Vitesse d'avance en fonction de la vitesse de coupe, (c) Vitesse de coupe en fonction du diamètre du foret.	115
Figure IV-5 Représentation des surfaces de réponse des données F_d avec le foret BSD : (a) Vitesse d'avance en fonction du diamètre du foret, (b) Vitesse d'avance en fonction de la vitesse de coupe, (c) Vitesse de coupe en fonction du diamètre du foret.	116
Figure IV-6 Tracés de surface 3D du facteur de délamination en fonction de f, N et d des structures biosandwichs.	118
Figure IV-7 Graphique de fonction de rampe 3D de l'optimisation multi-objectif pour (a) les outils HSS-TiN, (b) BSD et (c) HSS-TiN et BSD.	121
Figure IV-8 Tracé des contours de la désirabilité de F_d pour (a) les outils HSS-TiN et (b) BSD.	122
Figure V-1 Architecture ANN utilisée pour (a) l'outil HSS-TiN et (b) l'outil BSD.	135
Figure V-2 Schéma de validation de régression des données F_d (a-c) outils HSS-TiN et (e-f) BSD.	140
Figure V-3 Résultats de la validation ANN (a,c) pour les outils HSS-TiN et (b,d) pour les outils BSD. ..	142
Figure V-4 Comparaison entre F_d expérimental et prédit avec les modèles RSM et ANN	144
Figure V-5 F_d résiduels pour RSM et ANN (a) forets HSS-TiN et (b) BSD.	145

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 Avantage et inconvénients des fibres naturelles	6
Tableau I-2 Quelques propriétés physiques des fibres naturelles	10
Tableau I-3 Composition chimique de quelques fibres naturelles	11
Tableau I-4 Comparaison des propriétés mécaniques de diverses fibres végétales prises de la littérature avec les fibres conventionnelles	12
Tableau I-5 Quelques travaux des biocomposites en polymères thermoplastiques et thermodurcissables renforcés par différentes fibres naturelles [81,82]	24
Tableau I-6 Plusieurs procédés de perçage pour les NFRC rapportés dans la littérature	43
Tableau I-7 Différentes approches de mesure du délaminage des NFRC utilisées par de nombreux chercheurs	43
Tableau III-1 Composition chimique du jute	81
Tableau III-2 Recherche de pics (fibres de jute).....	85
Tableau III-3 Recherche de pics (résine époxy).....	86
Tableau III-4 Recherche de pics (liège)	87
Tableau III-5 Les paramètres de rugosité de surface "S" de l'échantillon : (a) trou n°1, (b) trou n°2 et (c) trou n°3.....	94
Tableau III-6 Les paramètres de profil de rugosité "R" de l'échantillon : (a) trou n°1, (b) trou n°2 et (c) trou n°3.....	97
Tableau IV-1 Paramètres de processus disponibles dans la littérature ouverte pour le perçage des composites polymères renforcés de fibres de jute	106
Tableau IV-2 Conception des expériences	107
Tableau IV-3 Résultats expérimentaux pour le facteur de délamination des trous percés à la sortie.	109
Tableau IV-4 Modèles mathématiques pour le facteur de délamination pour le perçage de la structure biosandwich tissu de jute-liège/époxy obtenus avec la méthode RSM	110
Tableau IV-5 ANOVA pour le modèle quadratique de surface de réponse pour le facteur de délamination.....	119
Tableau IV-6 Objectifs et plages de paramètres pour l'optimisation RSM des conditions de coupe... ..	123
Tableau IV-7 Optimisation des paramètres de réponse à l'aide du RSM	123
Tableau IV-8 Comparaison des techniques d'optimisation des réponses : RSM, GA et optimisation fmincon.....	124
Tableau V-1 Résultats expérimentaux pour le facteur de délamination des trous percés à la sortie.. ..	136
Tableau V-2 Architectures ANN et MSE et valeurs de R pour la formation, la validation et les tests pour les outils HSS-TiN et BSD	137
Tableau V-3 Modèle mathématique pour F_d (HSS-TiN) du perçage de la structure biosandwich tissu de jute-liège/époxy obtenus par la méthode ANN	137
Tableau V-4 Modèle mathématique pour F_d (BSD) du perçage de la structure biosandwich tissu de jute-liège/époxy obtenus par la méthode ANN	138

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)₂ : Hydroxyde de calcium
Na⁺ : 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).

Tg : Température de transition vitreuse

Paramètres de rugosité surfacique (Paramètres d'amplitude)

Sq : Moyenne quadratique hauteur

Ssk : Asymétrie

Sku : Aplatissement

Sp : Hauteur de crête maximale

Sv : Hauteur de puits maximale

Sz : Hauteur maximale

Sa : hauteur moyenne arithmétique

Paramètres de profil de rugosité

R_p : Hauteur de crête de profil maximale

R_v : Profondeur de vallée de profil maximale

R_z : Hauteur maximale

R_c : Hauteur moyenne

R_t : Hauteur totale

R_a : Écart de la moyenne arithmétique

R_q : Écart de la moyenne quadratique

R_{sk} : Asymétrie

R_{ku} : Aplatissement

R_{mr} : Rapport de matière relatif

R_{dc} : Différence de hauteur de section de profil

Symboles grecs

ε : Déformation à la rupture en traction (%).

σ : Contrainte à la rupture de traction (MPa).

Résumé

Les innovations industrielles s'accompagnent aujourd'hui de nouvelles générations de matériaux dont les matériaux composites, qui se développent et s'utilisent de plus en plus ces dernières années. En effet, la tendance de l'industrie est de s'orienter vers des produits offrant le coût le plus bas possible, de meilleures performances, voir même les deux. Dans un souci de protection de l'environnement, de la santé publique et de l'épuisement des ressources fossiles, de nouveaux matériaux bio-polymères et biocomposites ont été développés au cours de la dernière décennie. Ces nouveaux composites présentent un aspect écologique (matériaux recyclés ou biodégradables), cette tendance s'explique par l'augmentation exponentielle du nombre de publications dans le domaine des matériaux de type biocomposites. Le caractère biodégradable des fibres végétales contribue à la bonne santé de l'écosystème et leur faible coût et leur haute performance répondent aux intérêts économiques des industriels.

Dotés de nombreux avantages, les matériaux composites connaissent diverses applications dans les secteurs de l'automobile, de la construction et de la recherche aérospatiale (structures principales et secondaires des avions). Ce travail de thèse porte sur la modélisation et l'optimisation des processus d'usinage d'une structure biosandwich constituée d'une matrice époxy renforcée de fibres bidirectionnelles en jute et en liège (JFCE) 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

Industrial innovations are now accompanied by new generations of materials, including composite materials, which are being developed and used more and more in recent years. Indeed, the trend of the industry is to move towards products offering the lowest possible cost, better performance, or even both. In order to protect the environment, public health and the depletion of fossil resources, new bio-polymers and bio-composites have been developed during the last decade. These new composites present an ecological aspect (recycled or biodegradable materials), this trend is explained by the exponential increase in the number of publications in the field of bio-composite type materials. The biodegradable character of the vegetable fibers contributes to the good health of the ecosystem and their low cost and their high performance answer the economic interests of the industrialists.

Composite materials have many advantages and are used in a variety of applications in the automotive, construction and aerospace research sectors (main and secondary structures of aircraft). This thesis work deals with the modeling and optimization of the machining processes of a biosandwich structure made of an epoxy matrix reinforced with bi-directional jute and cork fibers (JFCE) using response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANN). Classical methods are particularly expensive in terms of computation time and appear divergent for problems with many parameters to manage. Therefore, our contribution consists in developing 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. Moreover, the results obtained are of a satisfactory quality. This work opens more promising perspectives that can be used in various applications.

ملخص

ترافق الابتكارات الصناعية حالياً أجيال جديدة من المواد، بما في ذلك المواد المركبة، التي تم تطويرها واستخدامها أكثر فأكثر في السنوات الأخيرة. في الواقع، يتمثل توجه الصناعة في التحرك نحو المنتجات التي تقدم أقل تكلفة ممكنة، أو أداء أفضل، أو كليهما. في محاولة لحماية البيئة والصحة العامة واستنفاد الموارد الأحفورية، تم تطوير مواد بيو بوليمر ومركبات حيوية جديدة على مدى العقد الماضي. هذه المركبات الجديدة لها جانب بيئي (مواد معاد تدويرها أو قابلة للتحلل)، ويفسر هذا الاتجاه من خلال الزيادة الهائلة في عدد المنشورات في مجال المواد من نوع المركب الحيوي. إن خاصية قابلية التحلل البيولوجي للألياف النباتية تساهم في الصحة الجيدة للنظام البيئي وكذلك تكلفتها المنخفضة وأدائها العالي يلبي المصالح الاقتصادية للصناعيين.

تتمتع المواد المركبة بالعديد من المزايا، ولها تطبيقات مختلفة في قطاع السيارات وبناء الهياكل الرئيسية والثانوية للطائرات). تتناول هذه الأطروحة نمذجة وتحسين عمليات تصنيع المواد المركبة التي تتكون من مصفوفة إيبوكسي معززة بألياف من الجوت ثنائية الاتجاه والفلين من خلال منهجية سطح الاستجابة والشبكات العصبية الاصطناعية. تعتبر الطرق الكلاسيكية باهظة الثمن بشكل خاص من حيث وقت الحساب وتضمنها العديد من القيم الواجب إدارتها. لذلك، تتمثل مساهمتنا في تطوير طريقة نمذجة وتحسين أسرع وأكثر كفاءة. خلال هذه الدراسة، يبدو أن نهج الشبكات العصبية الاصطناعية لديه إمكانات كبيرة لنمذجة العلاقات المعقدة التي 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 الأفاق الواعدة التي يمكن استغلالها في مختلف التطبيقات.

Introduction

générale

Introduction générale

Les matériaux à base de polymère époxy occupent une place prépondérante dans la recherche en ingénierie des matériaux, dans le domaine du développement des matériaux composites. En raison de leur biodégradabilité, de leur faible coût, de leur faible densité, de leurs propriétés mécaniques supérieures, de leur résistance élevée à l'usure, à la corrosion et à l'électricité, ces composites offrent de nombreux avantages.

La plupart des structures composites à renfort en fibres naturelles, connues sous le nom de composites à base de fibres naturelles (NFC), ont prouvé qu'elles pouvaient remplacer les composites à base de fibres synthétiques tels que les polymères renforcés en fibres de verre (GFRP). Les NFC sont en effet peu coûteux, légers, respectueux de l'environnement, non abrasifs, renouvelables, recyclables et biodégradables. En outre, la présence de fibres naturelles telles que le lin, le chanvre, le jute et le coton dans ces matériaux leur confère 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.

Bien que la majorité des pièces composites sont réalisées à l'échelle industrielle, il est souvent indispensable de les usiner pour les assembler aux structures de la pièce principale. En plus du découpage, le perçage est le processus d'usinage le plus couramment utilisé dans l'industrie pour l'assemblage de pièces mécaniques. Dans l'industrie aérospatiale, de nombreux panneaux et composants structurels disposent, ainsi, de trous de montage destinés à recevoir des vis ou des rivets pour leur montage. Ce processus d'usinage est cependant accompagné fréquemment de dommages indirects comme l'arrachement ou la rupture de fibres, la fissuration de la matrice et le délaminage.

En effet, le délaminage est une défaillance majeure que le perçage peut engendrer. Devant cette situation, diverses études expérimentales ont été menées afin d'évaluer l'effet des paramètres d'usinage sur le délaminage. Ainsi, il est révélé que le facteur de délaminage et la rugosité de surface sont principalement dépendants des paramètres de coupe dans le processus de perçage des composites. Néanmoins, peu d'attention a été accordée à la qualité du trou et aux effets des paramètres de perçage dans les composites renforcés de fibres naturelles (NFRP).

La présente étude est structurée en 4 principaux chapitres répartis comme suit :

Dans le premier chapitre, une recherche bibliographique ainsi que des généralités sur les fibres naturelles et leur rôle en tant que renfort sont exposés. Sur la base d'une étude bibliographique, ce chapitre présentera également les méthodes de traitement des fibres naturelles. Ensuite, les principales propriétés mécaniques et hygroscopiques ainsi que les techniques de fabrication des biocomposites à base de fibres végétales sont également abordées, sans oublier les principaux avantages et inconvénients de ces fibres comme renfort pour les matériaux composites, ainsi que l'usinage des biocomposites. Un état de l'art est ensuite réalisé, où sont présentées quelques recherches parues dans la littérature.

Dans le deuxième chapitre, les notions fondamentales de la statistique et de l'analyse des données sont exposées : techniques d'analyse par la méthodologie de surface de réponse RSM et les réseaux de neurones artificiels ANN.

Quant au troisième chapitre, il sera consacré aux matériaux et méthodes de fabrication du bio sandwich (jute/liège/époxy), ainsi qu'à la procédure expérimentale de perçage et à leur influence sur le facteur de délaminage F_d , tout en analysant les résultats des essais expérimentaux statiques réalisés en perçage. Le chapitre se termine par l'optimisation au moyen du modèle RSM et l'analyse de la variance ANOVA du facteur de délaminage.

Au quatrième chapitre, il est question de l'étude de la prédiction du facteur de délaminage par le modèle ANN ainsi qu'une comparaison entre les deux modèles RSM et ANN. Pour terminer, une conclusion générale de l'étude détaillée sera présentée, à la lumière des résultats acquis, tout en fournissant une série de recommandations à prendre en compte dans les recherches futures pour une meilleure utilisation de ce matériau.

Chapitre I

GENERALITE ET ETAT DE
L'ART : BIO-FIBRES ET
PROCEDES DE MISE EN
FORME

Chapitre I.

GENERALITE ET ETAT DE L'ART : BIO-FIBRES ET PROCEDES DE MISE EN FORME

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.4 Traitement à l'organosilane.....	16
I.5 Traitement d'estérification	17
I.5.1 Réaction d'acétylation.....	17
I.6 Compositions chimiques et propriétés physiques des fibres naturelles	19
I.6.1 Cellulose.....	19
I.6.2 Hémicellulose	20
I.6.3 Lignine.....	21
I.6.4 Autres composants	21
I.7 Modifications de la surface des fibres naturelles	21
I.8 Composites/Biocomposites	22
I.8.1 Composites renforcés par des fibres naturelles.....	23
I.8.2 Composites à matrice polymère (CMP)	23
I.8.3 Avantages de l'utilisation de composites à base de fibres naturelles.....	24
I.9 Techniques de fabrication de biocomposites	26
I.9.1 Technique de moulage ouvert.....	26
I.9.1.1 Pose à la main ou pose au pistolet	26
I.9.2 Technique de moulage fermé.....	27
I.9.2.1 Moulage par centrifugation.....	27
I.9.2.2 Moulage par compression.....	28
I.9.2.3 Vacuum Infusion	29
I.9.2.4 Moulage par transfert de résine (Resin Transfer Moulding-RTM).....	31
I.9.2.5 Le moulage par injection	32
I.9.2.6 Extrusion	33
I.10 Usinage des biocomposites.....	34
I.10.1 Techniques de perçage.....	35
I.10.1.1 Perçage mécanique conventionnel.....	36
I.10.1.2 Méthodes de perçage non conventionnelles.....	36
I.10.2 Paramètres du perçage	38
I.10.3 Mesures des paramètres de performance du perçage	39
I.10.3.1 Délaminage.....	39
I.11 Conclusion.....	44
I.12 Références	45

CHAPITRE I :

Généralité et état de l'art : bio-fibres et procédés de mise en forme

I.1 Introduction

Actuellement, l'utilisation de fibres naturelles comme renfort dans les composites présentes de nombreux avantages intéressants, notamment la réduction des matériaux provenant de sources non renouvelables et la réduction de l'impact environnemental. Des recherches intensives sont menées pour développer des biocomposites qui combinent des fibres naturelles avec des polymères biodégradables. L'un des principaux avantages de ces biocomposites est qu'ils sont totalement dégradables et durables. En outre, ces composés présentent une grande variété de propriétés et peuvent concurrencer les polymères non biodégradables dans différents domaines industriels.

L'un des aspects majeurs de l'utilisation des fibres naturelles est la réduction de la quantité de matériaux polymères dans l'application finale. Les possibilités d'utilisation des fibres naturelles sont vastes, allant des applications traditionnelles, dans l'industrie textile, au renforcement des matrices polymères thermoplastiques et thermodurcissables. Les fibres naturelles sont moins abrasives que les fibres inorganiques, sont généralement utilisées comme renfort et génèrent donc moins d'usure sur les équipements impliqués dans leur traitement [1]. En raison de leur faible coût de fabrication, de leur durabilité et de leur recyclabilité, les fibres naturelles offrent la possibilité d'apporter une plus grande valeur ajoutée au produit final, notamment dans l'industrie automobile. Le choix des fibres pour le renforcement des composites, il est essentiel de considérer plusieurs facteurs tels que : le coût et la disponibilité, l'effet sur les caractéristiques de viscosité du polymère, les propriétés physiques, la stabilité thermique, la résistance chimique, l'abrasivité ou l'usure, la biodégradabilité, la toxicité, la recyclabilité, la mouillabilité et la compatibilité avec la matrice polymère [2-4]. Il est particulièrement important de tenir compte de la possibilité d'une incompatibilité entre la matrice polymère et la fibre, étant donné que l'interaction interfaciale est, dans de nombreux cas, très faible. En effet, l'interaction interfaciale est souvent très faible. Dans ce cas, un troisième composant est utilisé dans le composite, réduisant la tension interfaciale et augmentant l'adhésion entre les phases du mélange de polymères : l'agent compatibilisant. De nombreux composés remplissent cette fonction, tels que les copolymères, le méthacrylate de glycidyle, l'anhydride maléique, etc [5].

La fabrication de biocomposites fait appel aux fibres naturelles, qui sont les plus utilisées et peuvent être appliquées dans plusieurs domaines tels que les traverses de chemin de fer [6], l'automobile [1,7,8], les pales d'éoliennes [9], l'industrie du bâtiment et de la construction [10–12] et les applications biomédicales [13–17]. Dans ce chapitre, l'accent est mis sur l'étude des composites polymères renforcés de fibres naturelles, leur fabrication et leurs applications possible.

1.2 Fibres naturelles et leur rôle en tant que renfort

Les fibres naturelles se trouvent dans les plantes, les animaux et les minéraux ; elles apparaissent spontanément dans la nature et/ou sont cultivées dans le cadre d'activités agricoles [18]. Parmi ces fibres, on distingue trois grandes divisions (Figure I-1), à savoir,

- 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 [19]. 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 1. Ces fibres comprennent les fibres lignocellulosiques car la majorité d'entre elles contiennent de la lignine dans leur structure, un polymère polyphénolique naturel [5,7,20,21].
- Fibres animales - comprennent généralement des protéines ; les exemples incluent la soie, la laine, le crin de cheval et le crin d'alpaga.

Les charges sont utilisées dans les polymères pour améliorer les propriétés et diminuer le coût des produits finaux. Les charges courantes et conventionnelles des polymères sont les fibres de verre et de carbone, le kevlar, la silice, le carbonate de calcium, l'argile, le graphite, le noir de carbone et les nanotubes de carbone [22]. Le recours aux fibres synthétiques comme agents de renforcement dans les matrices plastiques confère aux composites la durabilité souhaitée et les propriétés structurelles requises dans de nombreuses applications. Toutefois, la crise énergétique, l'épuisement des ressources pétrolières et les préoccupations environnementales croissantes ont conduit à une demande croissante pour les ressources renouvelables [23,24]. Contrairement aux fibres synthétiques, les fibres naturelles, en tant que ressources renouvelables, ne posent pas de problèmes environnementaux dans leur processus de fabrication et leur élimination. Par ailleurs, les fibres naturelles présentent certains avantages (Tableau I-1) tels que la légèreté, le faible coût, le caractère renouvelable, la biodégradabilité,

la recyclabilité, la flexibilité, le respect de l'environnement, la polyvalence et la résistance spécifique élevée [25–27].

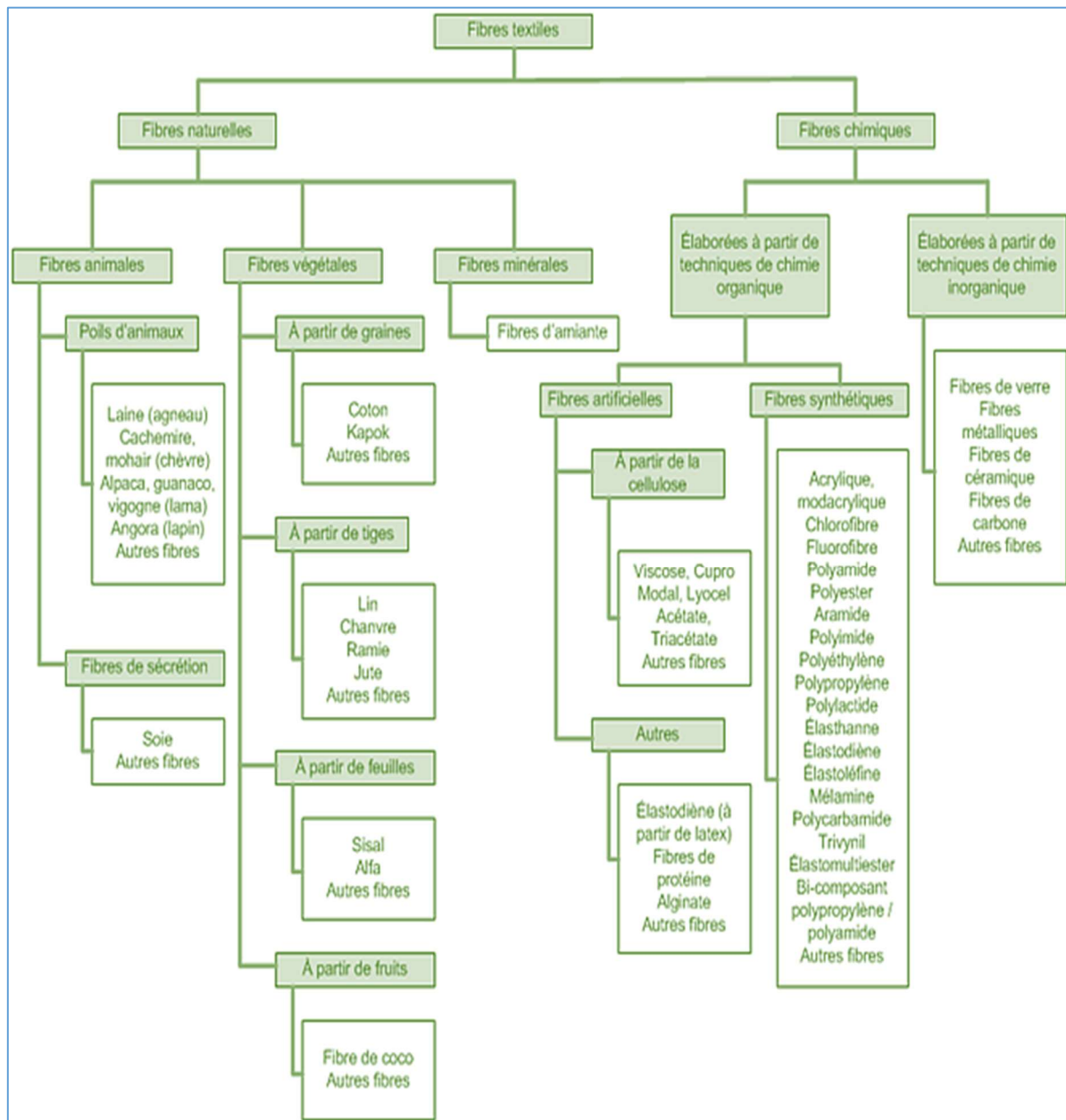


Figure I-1 Classification des fibres textile (naturelles et synthétiques) [28].

Tableau I-1 Avantage 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	

Sur la base des ressources utilisées, les fibres naturelles sont classées en trois groupes distincts, à savoir les fibres animales, minérales et végétales. Les fibres animales telles que la laine, la soie et les cheveux sont utilisées à des fins de renforcement et ont pour principal composant des protéines. Les fibres minérales comme l'amiante ont également été utilisées pour renforcer les polymères. Cependant, leurs applications ont des effets cancérigènes par inhalation et ingestion. Les fibres végétales, qui sont des matériaux lignocellulosiques, contiennent de la cellulose comme constituant principal. Il a été signalé à plusieurs reprises que les fibres végétales ont une résistance et une rigidité supérieures à celles des fibres animales. Par conséquent, les fibres végétales sont les agents de renforcement les plus appropriés pour les matrices polymères parmi toutes les fibres naturelles [29,30].

Durant les dernières décennies, les fibres végétales ont obtenu une place particulière en tant qu'agents de renforcement sur le marché des composites et aujourd'hui, les biocomposites à base de fibres végétales sont largement utilisés dans différentes industries, du secteur automobile au secteur de la construction [31]. On retrouve un large éventail de plantes fibreuses, plus de 2000 espèces, qui peuvent être appliquées comme agents de renforcement dans les polymères. Mais seules les plantes à forte teneur en fibres ont été appliquées à l'échelle industrielle, en raison de la possibilité d'une extraction facile et efficace des fibres [32]. Les principaux types de fibres utilisés dans les composites à base de polymères sont les fibres de lin, de chanvre, de jute, de ramie, de kenaf, de sisal, de coir, d'abaca et de feuilles d'ananas [31–33].

En fonction des voies d'utilisation, on distingue les plantes utilisées dans le processus de fabrication des fibres naturelles en plantes primaires et secondaires. Les plantes primaires sont celles qui sont cultivées uniquement pour la production de fibres, comme par exemple le coton, le jute, le java-kapok, le chanvre et le kenaf. Contrairement à cela, les plantes secondaires sont celles dont les fibres sont produites en tant que sous-produits comme la banane, le coco-coir, l'ananas, le palmier à huile et la paille de riz [33].

Les fibres lignocellulosiques ont un potentiel suffisant pour remplacer les fibres synthétiques telles que les fibres de verre dans les polymères de renforcement. En plus de leur caractère renouvelable et biodégradable, les fibres naturelles ont été considérées comme des agents de renforcement bénéfiques en raison de leurs propriétés favorables telles que leur faible densité et leurs performances mécaniques appropriées. Les fibres naturelles d'une densité de 1,15-1,5 g/cm³ sont beaucoup plus légères que les fibres de verre E d'une densité de 2,4 g/cm³. L'utilisation de fibres végétales, en tant que ressources renouvelables, conduit à la fabrication de produits "verts", qui sont recyclables à l'échelle industrielle. Il en résulte une réduction des émissions de gaz à effet de serre et de la production de déchets polluants. Par exemple, la culture du chanvre sur une terre agricole d'un hectare permet d'absorber environ 3,5 tonnes de dioxyde de carbone atmosphérique en une saison de récolte. En revanche, la production d'une tonne de plastique synthétique en polypropylène (PP) libère 3 tonnes de gaz carbonique dans l'atmosphère [32]. De plus, les fibres végétales comme les fibres de lin, de chanvre et de ramie ont des propriétés mécaniques relativement bonnes et leur module spécifique et leur résistance sont comparables aux fibres de verre synthétiques [34].

Dans la [Figure I-2](#), l'aspect physique et certaines des propriétés physiques et mécaniques des fibres lignocellulosiques et des fibres synthétiques sont comparés les uns aux autres. Il apparaît clairement dans cette figure que l'allongement à la rupture des fibres naturelles est souvent plus élevé que celui des fibres de verre et de carbone, ce qui se traduit par une meilleure performance des composites renforcés de fibres naturelles. De plus, les fibres végétales conviennent à la production d'isolants thermiques, en raison de la faible conductivité thermique des fibres naturelles, de l'ordre de 0,29-0,32 W/m.K [34]. Généralement, les avantages des fibres lignocellulosiques dans les composites à base de polymères par rapport aux fibres synthétiques peuvent être brièvement mentionnés comme suit : Durabilité et caractère renouvelable, accessibilité facile et coût réduit, biodégradabilité, recyclabilité thermique, résistance spécifique acceptable et autres propriétés spécifiques, extraction facile des fibres, faible densité, bonnes propriétés thermiques, traitement plus convivial et moindre usure des outils, pas d'irritation de la peau et meilleure récupération de l'énergie.

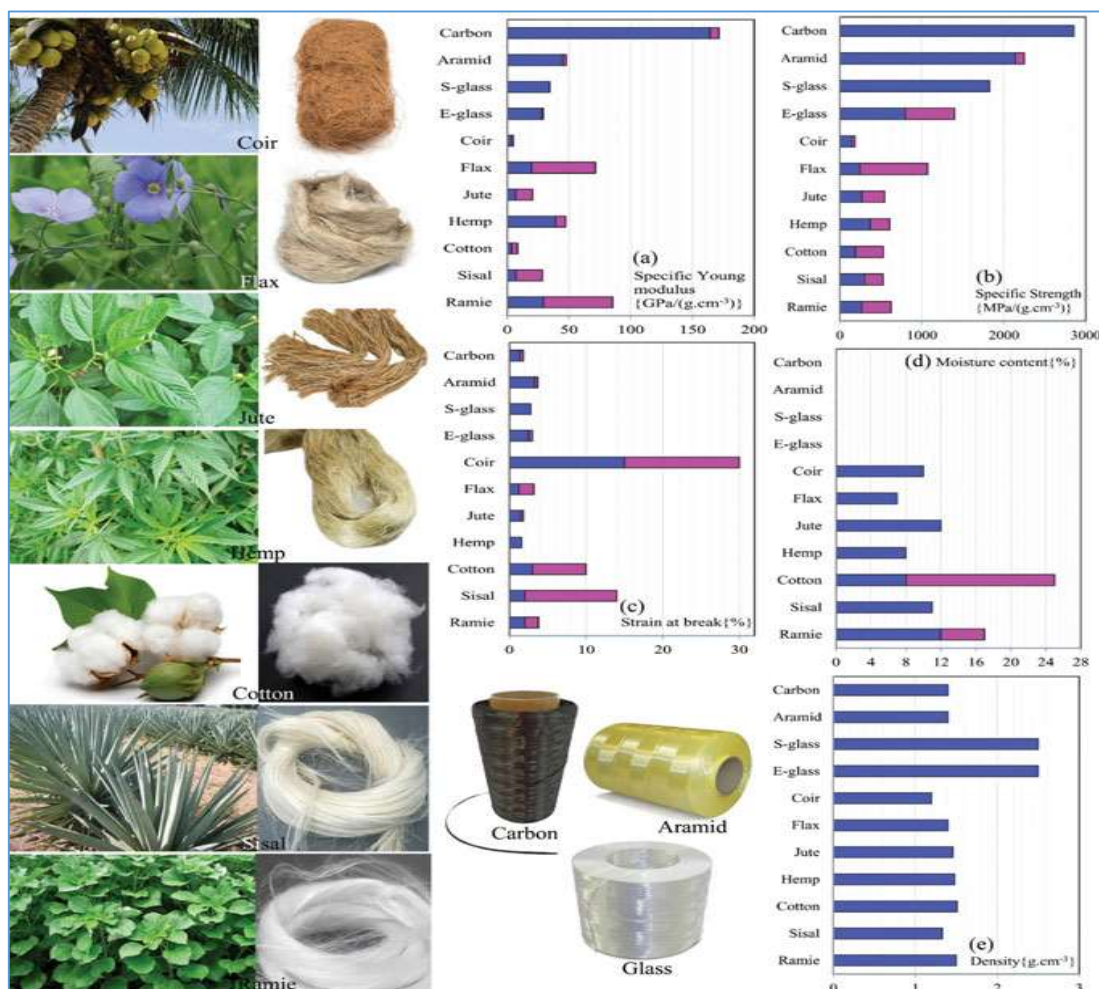


Figure I-2 Aspect physique des plantes, des fibres naturelles qui en résultent ainsi que des fibres synthétiques, (a)-(e) graphiques en colonnes pour certaines des propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales et synthétiques [29,33,35].

Leurs principaux inconvénients peuvent être décrits comme suit : Une résistance moindre, notamment à l'impact, une absorption d'humidité et un gonflement des fibres plus élevés, des températures de traitement maximales limitées, une faible résistance à la flamme, une qualité variable (les propriétés des fibres végétales dépendent fortement de la variété de la culture, de l'écotype, de la maturité, du lieu de culture, du processus de rouissage et des outils de traitement des fibres), une durabilité moindre (l'adhésion interfaciale de la matrice polymère et des fibres doit être modifiée) et des fluctuations de prix. Bien que leurs propriétés présentent quelques inconvénients, les fibres végétales ont été généralement acceptées comme l'alternative la plus prometteuse aux fibres synthétiques dans de nombreuses applications de composites polymères.

Toutes les fibres végétales sont naturellement lignocellulosiques et comprennent de la cellulose, de l'hémicellulose, de la lignine, de la pectine et des cires, à l'exception des fibres de coton. En fait, plus de 80 % du poids sec des fibres lignocellulosiques comprennent la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. La petite partie restante est constituée d'autres composants de la fibre tels que la pectine, les cires et les protéines [30,36]. La teneur en cellulose de chaque fibre détermine la résistance et le module de la fibre. La plupart des propriétés des fibres naturelles, y compris les caractéristiques mécaniques, dépendent du type de cellulose, de l'angle des microfibrilles, du degré de polymérisation et de la teneur globale en cellulose de la fibre [33].

La composition des différents composants des fibres est contrôlée par la nature des fibres et par les conditions du sol et de l'environnement dans lesquels la plante est cultivée. Les compositions chimiques de certaines fibres végétales sont présentées dans le [Tableau I-2](#). Les fibres lignocellulosiques sont classées en sept groupes en fonction de leur origine :

de matrice, dans laquelle les fibres de cellulose sont localisées comme agent de renforcement [31].

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

Pour renforcer la plante, les fibres libériennes sont incorporées dans la couche externe du liber et entourent la tige de la plante, stabilisant ainsi la plante. Grâce à leur teneur élevée en cellulose, les fibres libériennes fournissent un effet de renforcement efficace dans les biocomposites. Il a été signalé que les fibres de feuilles améliorent la résistance du composite. De même, les fibres de graines et de fruits auraient un effet sur le comportement élastomérique des composites [31]. Les différences dans les compositions chimiques et les caractéristiques physiques entraînent une large gamme de propriétés pour les fibres végétales [34].

On peut voir dans le [Tableau I-2](#) que les glucides avec la lignine sont les principaux composants des matériaux lignocellulosiques. La cellulose et l'hémicellulose sont les principaux composants de la paroi cellulaire des plantes [36]. Dans les fibres lignocellulosiques, la pectine agit comme un adhésif et maintient les fibres en faisceaux dans les tissus non fibreux.

[Tableau I-3](#) Quelques propriétés physiques des fibres naturelles.

Fibre		Densité (kgm ⁻³)	Longueur (mm)	Diamètre (µm)	Longueur cellules (mm)	Cristallin (%)
Bagasse		450-492	-	-	0,8-2,8	47
Banane	B	1500	60	150	-	-
	O	1500	10-300	50-250	3,4	-
Jute		1450	60	18-20/20-30	2,3	-
Ramie		1500	120	40-50	154	
Ananas		1440	20-80	1,56/4,5	10	
Sisal	B	1260-1330	3	18/100-300	1-8/2,2	72,2
Curaua'		920		97		75,6
coco	B	1390-1520	10-150	40-400	-	43-44
	O	1250-1500	20-150	100-450	0,75	-
Coton		1510	35	19		

B : Brésilien ; O : d'autres, LC : Luffa Cylendrica.

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

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

I.3 Méthodes de traitement des fibres naturelles

I.3.1 Traitement alcalin

Cette méthode est largement utilisée pour le traitement de surface des fibres végétales [30]. Ce procédé simple et efficace améliore l'adhésion matrice/fibre lignocellulosique [37]. Il

faut savoir que la compatibilité à court et à long terme des fibres avec la matrice polymère dépend principalement de l'élimination réussie des composants non cellulotiques de la surface des fibres comme les cires, les pectines, les hémicelluloses et les lignines. En effet, ces impuretés entravent la liaison interfaciale matrice/fibre et rendent les biocomposites sensibles à l'humidité et aux rayons UV. La meilleure technique pour confronter ce problème est le traitement alcalin [38]. La performance principale de la méthode de mercerisation pour améliorer l'adhésion matrice/fibre est importante sous deux aspects différents :

1. Pendant le processus de mercerisation, les faisceaux de fibres se brisent et une fibrillation se produit. Par la formation de fibres plus courtes avec des diamètres plus petits, la surface des fibres de renforcement augmente. Par conséquent, la plus grande surface interfaciale matrice/charge est fournie pour transférer la contrainte de la matrice aux fibres de renforcement [30,33]. Une réaction de traitement alcalin est généralement réalisée en trempant les fibres végétales dans une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium à une température prédéterminée pendant une période de temps particulière. Tout au long du processus, les ions Na^+ diffusent dans la cellulose cristalline et provoquent le gonflement des fibres. En conséquence, les groupes hydroxyle à la surface de la fibre sont ionisés en alcoxydes, ce qui est schématisé sur la Figure I-3. La réaction d'ionisation dans les régions cristallines convertit la cellulose mère (cellulose I) en cellulose alcaline. En lavant les fibres traitées avec de l'eau, qui se produit ensuite après la réaction d'ionisation, la cellulose cristalline se régénère et se transforme en cellulose II ayant une plus grande stabilité thermodynamique [30,34,38,39]. Cette transformation est un processus exothermique et irréversible [34].

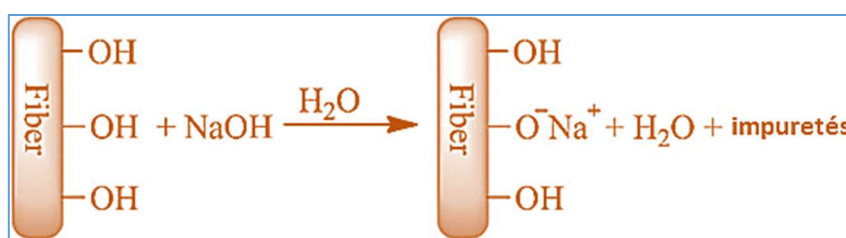


Figure I-3 Réaction proposée pour le traitement alcalin des fibres lignocellulosiques.

2. À travers le traitement de surface, les constituants non cellulotiques tels que l'hémicellulose, la lignine, les cires et autres matières organiques sont éliminés de la surface de la fibre. Les impuretés naturelles des fibres sont éliminées en même temps que les impuretés artificielles, si elles existent [30]. Puisque les groupes hydroxyle sont recouverts de substances non

cellulosiques, l'élimination des composants non cellulosiques fournit ainsi plus de liens hydroxyle à la surface de la fibre pour une adhésion plus efficace à la matrice [38]. Le traitement alcalin, basé sur les phénomènes mentionnés, entraîne une rugosité de surface plus élevée. Par conséquent, les surfaces des fibres végétales sont agrandies et l'imbrication mécanique des fibres avec la matrice est améliorée, ce qui conduit à une amélioration de l'adhésion interfaciale et de la compatibilité des fibres et de la matrice. Le procédé de mercerisation est appliqué comme méthode de prétraitement dans de nombreux procédés de modification tels que la silanisation, l'estérification et l'éthérification afin d'augmenter la teneur en cellulose à la surface des fibres et de fournir plus de points pour les traitements ultérieurs [40–42]. La méthode alcaline permet également d'augmenter sensiblement le taux de cellulose amorphe [30]. Les effets du traitement alcalin sur diverses propriétés des fibres lignocellulosiques sont contrôlés par les conditions du processus de traitement telles que la concentration de la solution de NaOH, la température et la durée de la réaction. Il convient de noter qu'en raison de l'élimination des composants non cellulosiques, certains vides peuvent se former dans les structures des fibres tout au long du processus. De plus, ces réactions peuvent dépolymériser la cellulose native et effondrer les structures cristallines de la cellulose [36]. Par conséquent, le traitement alcalin peut entraîner des dommages importants à la structure de la fibre et affaiblir ses propriétés mécaniques. Aussi, le processus de traitement doit être effectué en utilisant les conditions optimales prédéterminées de la réaction alcaline pour chaque type de fibres végétales.

La Figure I-4 et I-5 montre les changements structurels des fibres courtes de lin en fonction de la concentration de NaOH dans la solution alcaline pendant le processus de mercerisation. En observant les images, on constate que les faisceaux de fibres se brisent davantage et provoquent une fibrillation en augmentant la concentration de NaOH. Ensuite, on observe une diminution du diamètre des fibres et une augmentation du rapport d'aspect des fibres après l'élimination des impuretés naturelles et artificielles. En outre, une topographie plus rugueuse de la surface de la fibre est obtenue après le traitement [39].

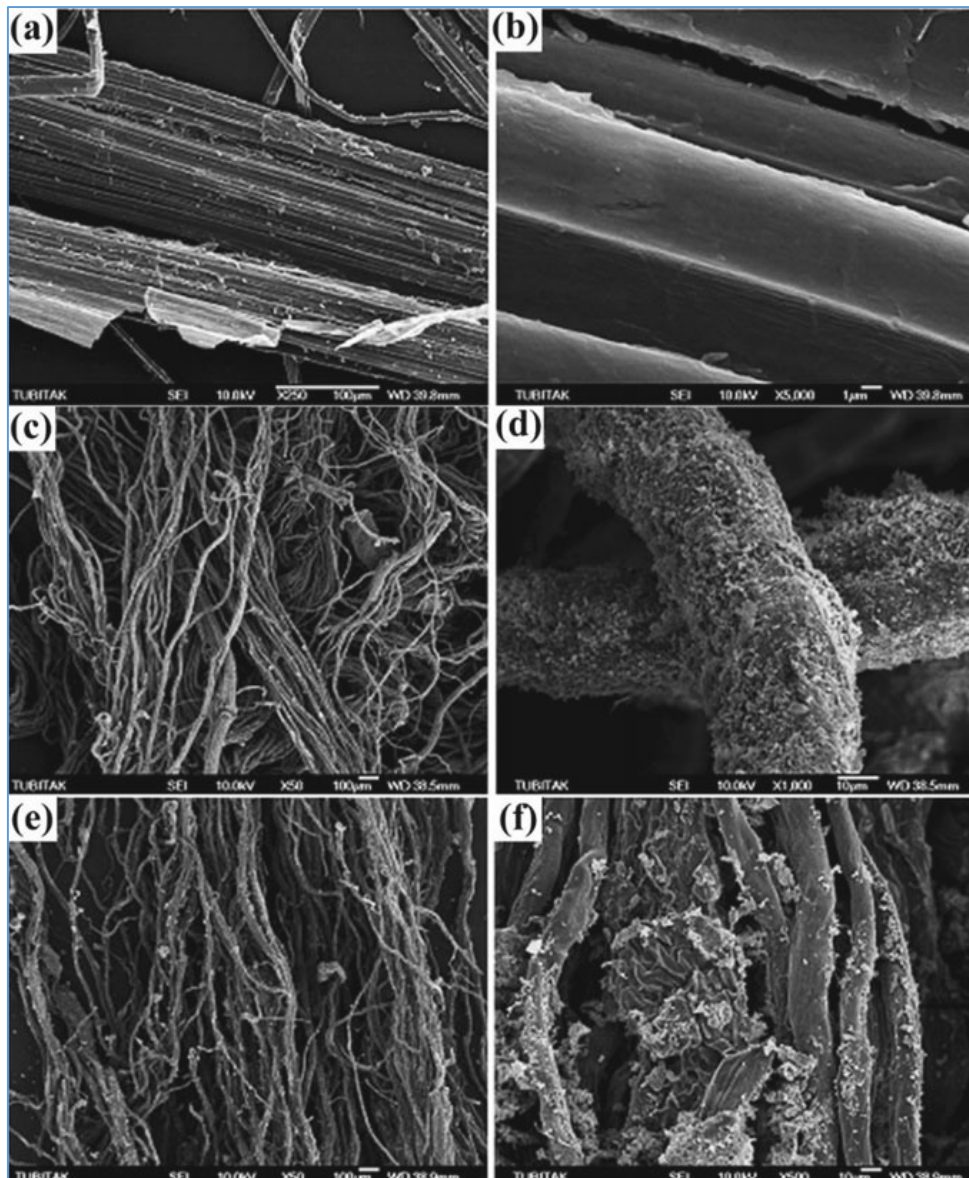


Figure I-4 a et b Fibres de lin non traitées, c et d Fibres de lin traitées avec une solution de NaOH à 10%, e et f Fibres de lin traitées avec une solution de NaOH à 30% [39].

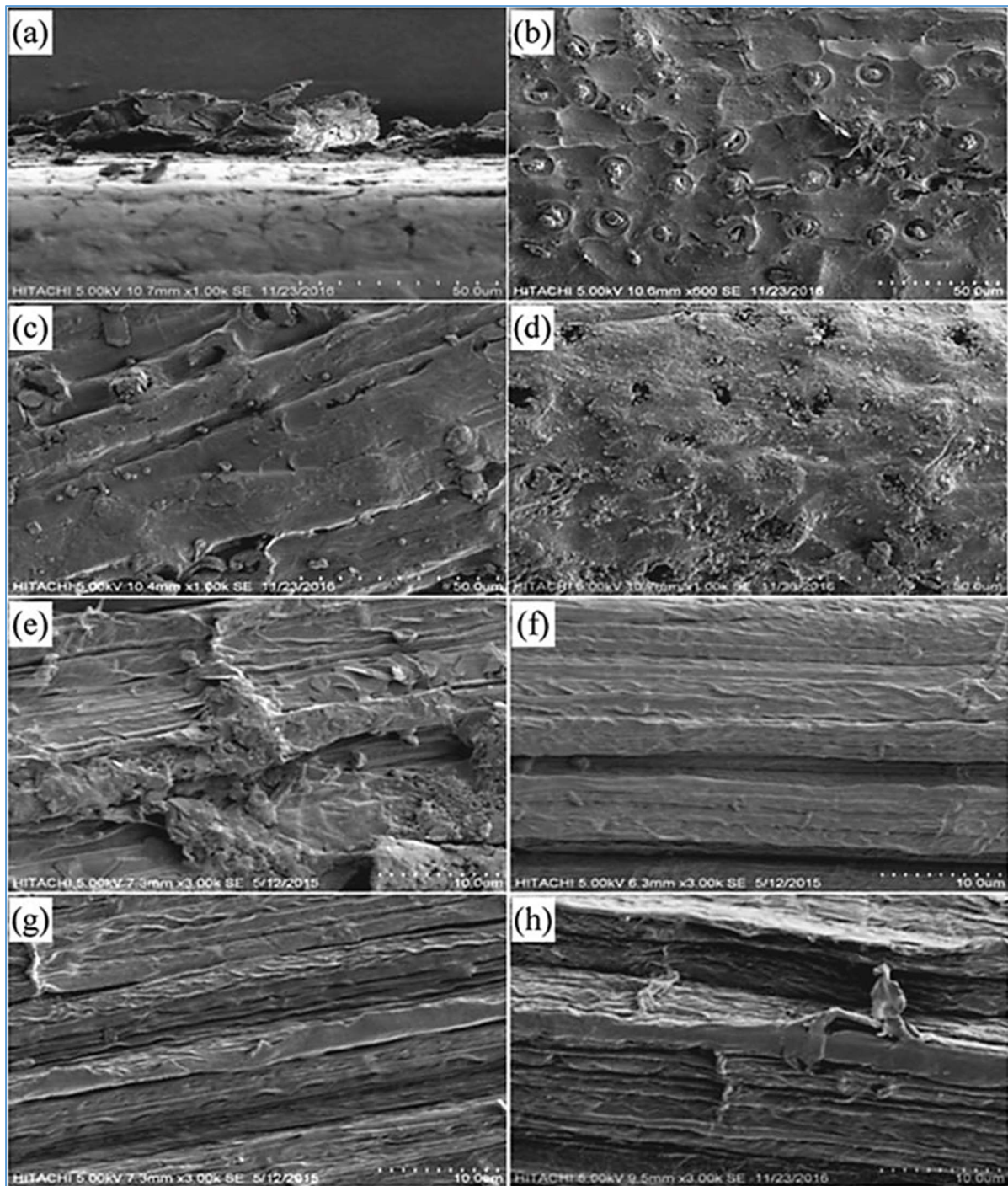


Figure I-5 Images MEB de : (a) CF non traitée, (b) CF traitée par NaOH, (c) CF traitée par silane, (d) CF traitée par $\text{Ca}(\text{OH})_2$, (e) PALF non traitée, (f) PALF traitée par NaOH, (g) PALF traitée par silane, (h) PALF traitée par $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [43].

I.4 Traitement à l'organosilane

La principale catégorie d'agents de couplage est celle des organosilanes, qui sont utilisés à des fins industrielles pour améliorer l'adhésion entre les fibres de verre et les matrices polymères [32]. Pour que les molécules de ces agents de couplage soient efficaces, elles doivent

contenir différents agents fonctionnels afin de développer une liaison chimique avec les deux phases, notamment la matrice polymérique et les fibres de renforcement [30]. Parmi les organosilanes, les alcoxysilanes ont la structure générale de $X-R_1-Si(OR_2)_3$. Selon les groupes atomiques substitués à R_1 et R_2 , ce groupe de matériaux est très diversifié et largement utilisé pour améliorer les propriétés interfaciales du biocomposite (fibre lignocellulosique/matrice polymère) [37,41,44–46]. Le groupe OR_2 est un groupe alcoxy hydrolysable en milieu hydrique [34]. Il est possible de savoir que les groupes siloxane alcoxy des agents de couplage peuvent réagir directement avec les groupes silanol des surfaces des fibres de verre dans les composites renforcés de fibres de verre. Par contre, les composites renforcés de fibres lignocellulosiques exigent quelques traces d'eau dans le milieu réactionnel afin de former des groupes silanol dans la structure de l'agent de couplage. Par la suite, les groupes silanol formés participent à la réaction de condensation avec les groupes hydroxyle de la surface de la fibre [30]. De plus, le groupe terminal X dans la structure générale de la molécule d'alcoxysilane est un groupe fonctionnel organique qui peut réagir avec la chaîne de la matrice polymère et créer des liaisons covalentes entre les fibres lignocellulosiques et la matrice polymère.

I.5 Traitement d'estérification

I.5.1 Réaction d'acétylation

Le procédé d'acétylation utilisant l'anhydride acétique est considéré comme la méthode la plus courante pour modifier le bois [47]. Ces dernières décennies, cette méthode a été aussi appliquée à l'échelle industrielle pour le traitement des matériaux lignocellulosiques. Divers composés chimiques, tels que le chlorure d'acyle, l'acide acétique et l'anhydride acétique, sont employés dans le processus d'acétylation de la lignocellulose [30]. La réaction d'hydrolyse de l'anhydride acétique en acide acétique est une réaction rapide hautement exothermique et la réaction des fibres avec l'anhydride acétique produit de l'acide acétique comme sous-produit, qui doit être éliminé après le traitement de surface des fibres [36]. Durant le traitement d'acétylation, en utilisant l'anhydride acétique, le groupe R_2 est substitué par le groupe $-CH_3$. Des études ont confirmé que la réaction de substitution des groupes acétyle avec les groupes hydroxyle des composants amorphes des fibres lignocellulosiques comme la lignine et l'hémicellulose est plus probable que la réaction avec les groupes hydroxyle de la cellulose hautement cristalline.

Pour augmenter la vitesse de la réaction d'acétylation, il est possible d'utiliser des catalyseurs. Les catalyseurs les plus fréquemment utilisés pour les réactions d'acétylation sont la pyridine, l'acide sulfurique et l'acétate de potassium et de sodium. Lorsque l'on utilise un acide fort comme catalyseur, le choix approprié des conditions de réaction pour le traitement efficace de la fibre est critique, la réaction pouvant provoquer la dégradation de la microstructure de la fibre et par conséquent, la détérioration des propriétés de la fibre [37].

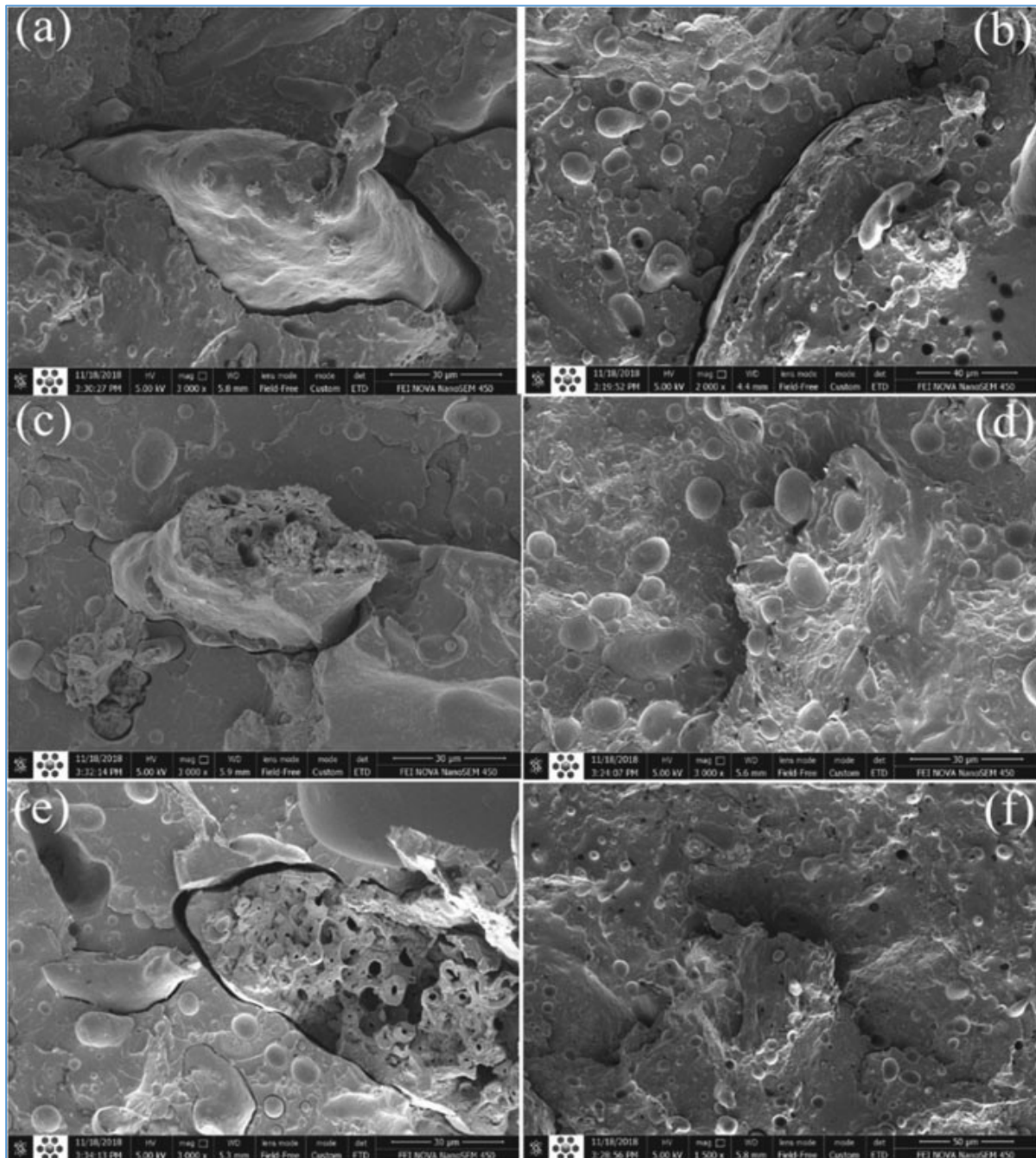


Figure I-6 Images MEB des surfaces cryofracturées de biocomposites PLA/RSF non traités (micrographies à gauche) et de biocomposites PLA/RSF acétylés (micrographies à droite) contenant 6 phr de PEG à une charge de: a et b 10 phr, c et d 20 phr, e et f 30 phr [37].

La [Figure I-6](#) illustre des images MEB des surfaces cryo-fracturées des biocomposites PLA/fibre de paille de riz (RSF) en présence de poly (éthylène glycol) (PEG) comme plastifiant. Chaque colonne de gauche et de droite concerne les biocomposites contenant des fibres non traitées et acétylées, respectivement. Pour la préparation des biocomposites PLA/RSF, le traitement d'acétylation des fibres a été effectué en utilisant de l'acide acétique et de l'anhydride acétique, accompagnés d'acide sulfurique comme catalyseur. Les images des biocomposites contenant des fibres non traitées montrent que l'arrachement des fibres et le décollement des fibres et de la matrice sont importants, alors que ces phénomènes sont observés dans une moindre mesure sur la surface fracturée du biocomposite contenant du RSF acétylé.

L'image MEB de la surface fracturée des biocomposites PLA/fibres d'agave, qui contiennent des fibres non traitées, révèle un arrachement intense des fibres et une grande quantité de fibres décollées ([Figure I-7](#)). À des grossissements plus élevés, certaines lacunes interfaciales sont évidentes, indiquant un décollement de la matrice et des fibres. Par ailleurs, la compatibilité fibre/matrice des composites PLA maléaté/fibre d'agave a été améliorée et un transfert efficace des contraintes à travers les interfaces matrice/fibre a été obtenu. Les images MEB de ces biocomposites montrent que la rupture se produit principalement au niveau de la masse des fibres et de la matrice, et non au niveau des interfaces. Par conséquent, le changement observé dans le mécanisme de rupture a conduit à une réduction de la résistance au choc des biocomposites PLA/ fibre d'agave traitée par rapport aux biocomposites PLA/fibre non traitée, car l'arrachement des fibres nécessite plus d'énergie dissipée pendant la rupture [48].

I.6 Compositions chimiques et propriétés physiques des fibres naturelles

La fibre naturelle est un matériau composite composé de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine et d'autres composants. Les propriétés chimiques dépendent principalement de la teneur en cellulose et peuvent varier ; il est donc important d'analyser chaque composant présent dans la structure [6]. La composition chimique et physique, telle que la structure de la fibre, la cellulose et le degré de polymérisation, détermine principalement les propriétés physiques des fibres végétales.

I.6.1 Cellulose

La cellulose est un composant essentiel de toute plante et constitue un polymère qui existe en abondance dans la nature. En raison de sa nature chimique, elle est capable de former des liaisons hydrogène et est très hydrophile. Entre 40 et 50 % du poids sec du bois est sous

forme de cellulose [49]. Du point de vue chimique, la cellulose est un polysaccharide de formule moléculaire $(C_6H_{10}O_5)_n$ et composé de l'union de molécules de β -D-glucopyranose par des liaisons β -1,4-glycosidiques. En raison de son haut degré de cristallinité et de polymérisation, la cellulose est généralement plus stable à la dégradation, qu'elle soit mécanique, chimique ou thermique, par rapport aux composants non cellulosiques qui forment ces fibres

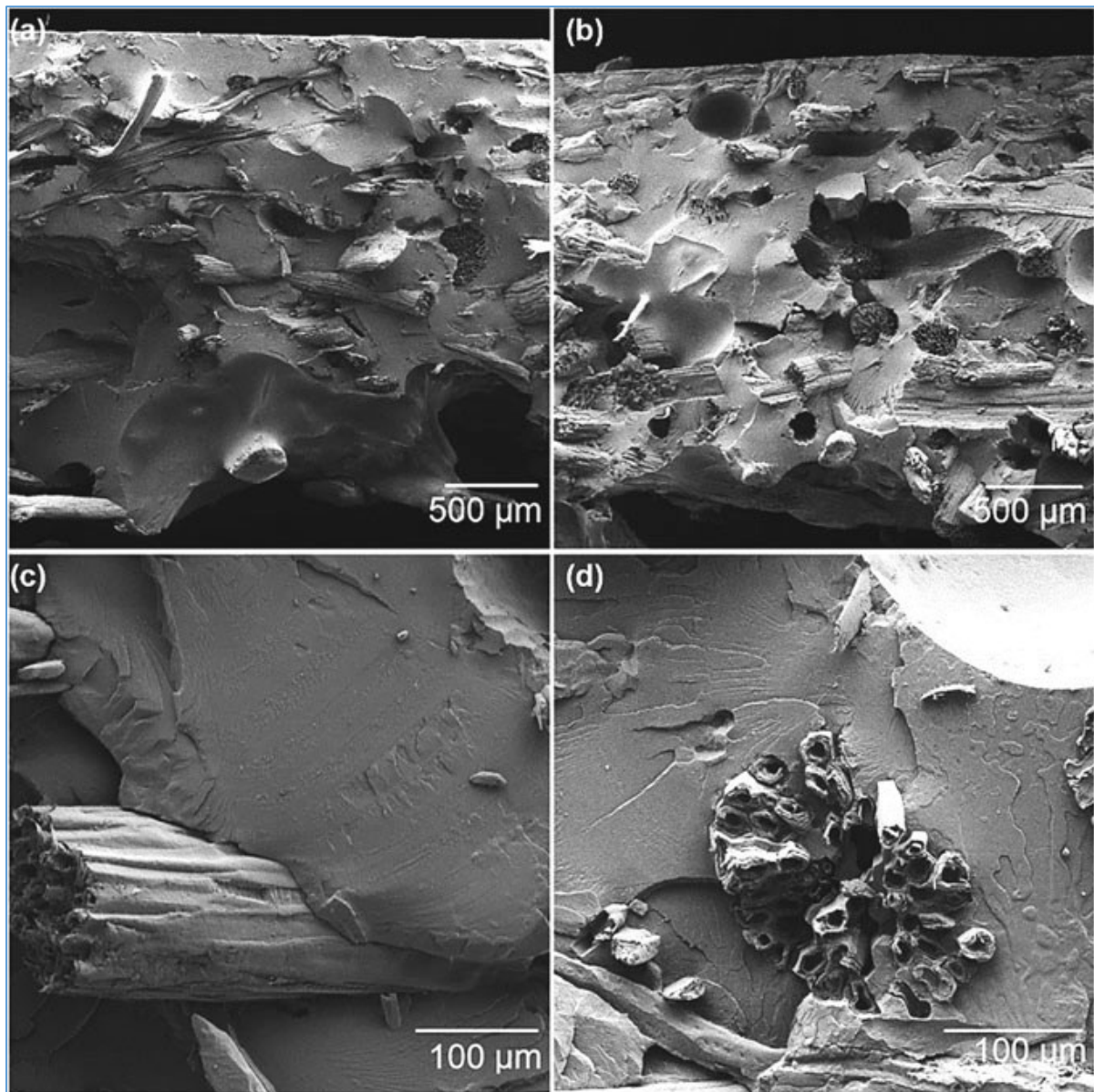


Figure I-7 Micrographies MEB de : a et c biocomposites fibre d'agave/PLA non traités (UFBC), b et d biocomposites fibre d'agave/PLA traités (TFBC) à une charge de fibre fixe de 20 % en poids. Reproduit avec la permission de [48].

I.6.2 Hémicellulose

En plus de la cellulose, les fibres naturelles contiennent également de l'hémicellulose, qui représente 25 à 40 % du poids sec du bois [49]. Les différences observées entre la cellulose

et l'hémicellulose sont associées à la structure chimique. Les hémicelluloses sont formées de divers sucres avec plusieurs branches qui se lient aux microfibrilles de cellulose. Leur faible cristallinité peut être liée à la structure ramifiée et aléatoire des hémicelluloses. Comparativement à la cellulose, les hémicelluloses ont des chaînes polymères plus courtes et, par conséquent, un faible poids moléculaire. L'hémicellulose est composée de pentoses, d'hexoses et est plus sensible à l'hydrolyse par rapport à la cellulose, car elle a un degré de polymérisation plus faible [49]. Elle se trouve principalement dans la paroi cellulaire primaire avec des polymères ramifiés contenant des sucres de cinq à six carbones de structures chimiques variées.

I.6.3 Lignine

Par ailleurs, la lignine est le troisième composant fondamental des fibres naturelles. Elle constitue entre 15 et 35 % du poids sec du bois. La lignine est une molécule non cristalline très complexe composée d'un grand nombre d'unités phényle-propane [49]. Elle est amorphe et possède une structure aromatique avec un poids moléculaire élevé.

I.6.4 Autres composants

Outre la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, on trouve plusieurs autres composants dans la structure des fibres naturelles. Ces composés sont en moindre quantité et peuvent être des cires, des acides, des alcools, des protéines, des matières inorganiques, etc. En général, il est nécessaire d'apporter des modifications chimiques aux fibres naturelles afin d'éliminer les impuretés superficielles et les groupes hydroxyle hydrophiles. Ces modifications, associées à des traitements physiques, sont couramment employées pour modifier la surface et la structure des fibres afin d'en augmenter les performances [25,50].

I.7 Modifications de la surface des fibres naturelles

De nombreuses propriétés des composites sont définies par la liaison interfaciale entre les deux matériaux (matrice/fibre) dans un biocomposite. Lorsque l'interface est propre, on obtient une bonne liaison entre la matrice et les fibres, ce qui favorise un transfert de charge efficace. Si la compatibilité et l'adhésion entre les fibres et la matrice sont insuffisantes, cela peut entraîner des problèmes de traitement et de performance du matériau [26]. En conséquence, afin d'obtenir de meilleures interactions et d'améliorer la compatibilité fibre/matrice, les fibres sont généralement soumises à des modifications physiques et chimiques

[27]. Des procédés chimiques et physiques permettent de traiter la surface de la fibre et d'optimiser cette interaction [51].

En ce qui concerne les traitements chimiques, une variété de produits chimiques peuvent être utilisés, notamment des traitements alcalins ou des agents de couplage. Ces traitements peuvent influencer la fibrille cellulosique, le degré de polymérisation, l'extraction des composés de lignine et d'hémicellulose, réduire le nombre de groupes hydroxyles de cellulose dans l'interface fibre-matrice, améliorer l'adhésion fibre-matrice, augmenter la résistance du composite, réduire son absorption d'eau et en améliorer la stabilité thermique [50,52]. Les composites en fibres d'abaca, de coco, de tremble, de lin, de chanvre, de ramie, de sisal et de jute ont été étudiées en utilisant des traitements chimiques et les propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, le module de flexion et le module de Young ont été augmentées de manière significative ainsi que le module de stockage [53–56].

En effet, les traitements physiques permettent d'améliorer la stabilité thermique, la cristallinité, les caractéristiques physiques et mécaniques, la modification de la surface, la polarité et la compatibilité entre les fibres hydrophiles et la matrice hydrophobe [26,57,58]. À titre d'exemple, un traitement thermique (autoclave) tel que démontré par Tavares et al. [59] sur la fibre de graines d'açai (*Euterpe oleracea*) a été appliqué afin de les utiliser en tant que renfort de composite avec une matrice en polypropylène (PP) ; ce traitement a permis d'augmenter la cristallinité de la fibre et la rugosité de sa surface, sans pour autant affecter la stabilité thermique des fibres. De plus, il a amélioré la résistance à la traction, tout en réduisant le module de traction [59]. Par ailleurs, parmi les traitements utilisables, citons le traitement au plasma par lequel Sun [60] a démontré que le traitement de surface des fibres naturelles permettait de produire des surfaces plus rugueuses et plus lisses. Ce type de traitement peut offrir de nombreux avantages, notamment la modification des propriétés de surface des textiles et la réduction de l'utilisation de produits chimiques dangereux pour l'environnement [60]. Les travaux publiés récemment rapportent l'utilisation combinée de méthodes chimiques et physiques afin d'obtenir des propriétés améliorées des biocomposites [61–63].

I.8 Composites/Biocomposites

Différentes combinaisons de métaux, de céramiques et de polymères peuvent former des matériaux composites. Les composites peuvent être classés sur la base de leurs composants structurels [3] :

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 [64]. 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 [51].

I.8.1 Composites renforcés par des fibres naturelles

De nombreuses études ont été menées concernant l'incorporation de fibres naturelles telles que le chanvre [65,66], le jute [67,68], le bananier [69,70], le kenaf [71–73], la ramie [67], le sisal [67,74], le coir [75], le bambou [70,76,77], le lin [78,79] et l'abaca [68,80], afin d'explorer leur potentiel de renforcement dans différentes matrices polymères.

I.8.2 Composites à matrice polymère (CMP)

La matrice est un matériau de liaison qui sert à maintenir les fibres et à transférer les charges externes aux renforts internes. Les composites polymères se composent d'une grande variété de résines thermodurcissables et thermoplastiques qui possèdent différentes structures chimiques et qui subissent différentes réactions. La matrice polymère renforcée par des fibres naturelles présente une résistance plus élevée, qui permet aux liaisons interfaciales de conserver leurs identités chimiques et mécaniques. En effet, les fibres sont les principaux composants des porteurs de charge, tandis que la matrice les maintient en place et dans une orientation souhaitée [81]. Dans ces composites, deux types de matrices sont couramment utilisés, les thermoplastiques et les thermodurcissables, comme le montre le [Tableau I-5](#). La résine thermodurcissable est polymérisée par l'application de chaleur et souvent par l'ajout de produits chimiques appelés agents de polymérisation. Les caractéristiques mécaniques des fibres libériennes provenant d'une partie spécifique d'une plante - le phloème - dépendent de la teneur

en cellulose et de l'angle des microfibrilles. Les fibres de banane ont une structure complexe avec une teneur élevée en cellulose (60-65%) et un faible angle des microfibrilles. De ce fait, la fibre de banane devient l'un des renforts les plus importants en raison de sa bonne résistance spécifique et de sa résistance à la dégradation [27].

Tableau I-5 Quelques travaux des biocomposites en polymères thermoplastiques et thermodurcissables renforcés par différentes fibres naturelles [81,82].

Thermoplastique	Caractéristiques	Fibres végétales
Polypropylène (PP)	Matériau léger, bonnes propriétés d'isolation, non toxique, faible absorption d'humidité et faible coût.	Curaua [90], flax [91], hemp [92], jute [86], palm, sisal [93], wheat straw [93], banana [87]
Polyéthylène (PE)	Non-toxique, faible absorption d'humidité, faible coût, rigide et résistant à l'humidité.	Banana [94], green coconut husks [95], rice husk [96], sisal
Nylon	Grande stabilité et adaptabilité	Kenaf, flax, hemp [97]
Cellulose acetate	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 [98,99], curauá [100], sisal [101]
Polystyrène (PS)	Résistance élevée aux alcalis et aux acides, faible densité et faible absorption d'humidité, faible résistance aux solvants organiques et à la chaleur.	Agave [102], banana [103], hemp [103], sisal [103]
Polyvinyl chloride (PVC)	Résistant, imperméable, durable, inoffensif, non toxique.	Areca [104], bamboo [105], straw [106], rice [107]
High-density polyethylene (HDPE)	Bonne résistance aux chocs à basse température et excellente résistance chimique.	Banana [108], curaua [109], sisal [110]
High impact polystyrène (HIPS)	Flexibilité, résistance aux chocs, facilité d'usinage et faible coût.	Green coconut husks [111], sisal [112], sugar cane bagasse [113]
Polyester	Solide, flexible, sèche rapidement, résiste aux plis et au rétrécissement.	Bamboo [114], banana [115], coconut [116], curaua [117], flax [118], hemp [119], jute [120], pineapple [121], sisal [122,123]
Polyurethane (PU)	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 [124], coir [125], sisal [126]
Epoxy	Pratiquement aucun rétrécissement après le moulage, résistance aux chocs et aux températures élevées, résistance aux produits chimiques et aux champignons.	Banana [127,128], coir [129], cotton [130], flax [131,132], hemp [132], Jute [133,134], pineapple [135], sisal [136,137]

I.8.3 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 charge et l'orientation, la présence de cavités et l'absorption d'humidité des fibres [82]. La stabilité thermique est constamment affectée par l'humidité, les additifs et d'autres

facteurs [83]. En faisant varier la matrice composite, il est possible d'avoir des variations significatives des valeurs de la résistance à la traction et du module d'Young. Par ailleurs, si ces fibres sont alignées vers la charge souhaitée, la résistance est également augmentée. Un tel comportement a été largement rapporté dans la littérature [84]. Cependant, les fibres naturelles peuvent présenter des propriétés mécaniques différentes en fonction de la liaison interfaciale entre le polymère, ainsi le module de Young du biocomposite en fibres de *jowar* est rapporté comme étant 11% plus élevé que celui des biocomposites en fibres de bambou ou 45% plus élevé que celui des biocomposites en fibres de sisal, respectivement, pour une fraction volumique de fibres de 40 %. En outre, la résistance à la flexion du composite de *jowar* est supérieure de 4 % à celle des fibres de bambou (35 %) et aussi à celle des fibres de sisal, avec un module de flexion 1,12 fois et 2,16 fois supérieur à ceux des composites de bambou et de sisal, respectivement. Les fibres de *jowar* en tant que renforcement dans une matrice polyester peuvent être développées avec succès en tant que matériau composite contenant une résistance et une rigidité élevées, avec des applications légères par rapport aux composites conventionnels de sisal et de bambou [85].

En ce qui concerne les fibres de jute, leur utilisation peut également améliorer les performances mécaniques des composites. À titre d'exemple, la résistance à la traction obtenue pour un composite en PP réalisé à partir de ses propres filaments a été de 23,24 MPa. Toutefois, lorsque ce même filament de PP est fabriqué à partir de fils de jute, avec une teneur en jute de 19,34 %, sa résistance à la traction augmente jusqu'à 31,21 MPa. Si la teneur en jute augmente encore jusqu'à 37,1 % et 55,89 %, la résistance à la traction atteint 38,27 MPa et 53,06 MPa, respectivement. Le module de traction d'un composite contenant un fil de jute et une matrice PP, avec des teneurs en fibres de 19,34%, 37,1% et 55,89%, présente une augmentation du module de traction de 23,7%, 50,42% et 79,31%, respectivement, par rapport au PP pur [86].

La contrainte de traction maximale et le module de traction des fibres de banane incorporées dans des composites de polypropylène (50 % en poids) sont respectivement supérieurs de 70,82 % et 67,60 % à ceux du PP pur [87]. En utilisant la même matrice, la variation des propriétés mécaniques se produit en utilisant différentes fibres naturelles, l'utilisation de la fibre de lin avec la résine époxy a augmenté de 81,95% la résistance à la traction par rapport à la fibre de banane dans la même matrice [88,89]. De même, les composites hybrides comprenant deux fibres ou plus dans une même matrice permettent d'améliorer la résistance à la traction. Les composites de chanvre avec de la résine époxy présentent une résistance à la traction de 36,48 MPa, un composite hybride avec chanvre/lin a 44,17 MPa et

les composites hybrides avec chanvre/lin/jute cette valeur a augmenté à 58,59 MPa. Une augmentation de 21,08% et 60,60%, respectivement [89].

I.9 Techniques de fabrication de biocomposites

Depuis les premières civilisations et jusqu'aux innovations futures, les matériaux composites jouent un rôle important. En effet, ces matériaux offrent de nombreux avantages tels que la résistance à la corrosion, la souplesse de conception, la durabilité, la légèreté et la solidité. Les produits composites sont utilisés depuis des milliers d'années dans différents domaines. La toute première mention remonte à 1500 avant J.-C., lorsque les premiers colons égyptiens et mésopotamiens ont utilisé un mélange de boue et de paille pour créer des bâtiments solides et durables. Ce mélange de terre et de paille lui donne une forte propriété de résistance à la compression, à la torsion ou à la flexion [64]. En 1200 après J.-C., les Mongols ont combiné de la "colle animale", des os et du bois afin de produire le premier arc composite. Après la guerre, les matériaux composites ont continué à prendre leur envol et ont connu une croissance rapide dans les années 1950. Au cours des années suivantes, on trouve de multiples traces de l'utilisation des composites dans les domaines les plus divers. Avec la progression de l'utilisation des composites, les techniques de transformation ont été améliorées, ce qui permet aujourd'hui de développer divers matériaux pour des applications allant des turbines d'avion aux produits avancés dans le domaine biomédical. En effet, le secteur des composites est toujours en développement, avec une grande partie de la croissance désormais axée sur les énergies renouvelables et les nouvelles techniques de fabrication. Les paragraphes suivants traitent des principales techniques de fabrication des composites, telles que la stratification à la main, le moulage par compression, le moulage par injection et d'autres encore [138].

I.9.1 Technique de moulage ouvert

I.9.1.1 Pose à la main ou pose au pistolet

Cette technique est la méthode la plus simple de mise en œuvre des composites, qui ne nécessite qu'une infrastructure minimale [138]. Les renforts en fibres sont placés à la main dans un moule et la résine est appliquée à l'aide d'un pinceau, d'un rouleau ou d'un spray, comme le montre la Figure I-8. Le processus de durcissement ne nécessite pas de chaleur. Néanmoins, cette technique pose quelques problèmes en termes de qualité : notamment, en raison de l'emprisonnement de l'air, la matrice peut être faible et les pièces peu résistantes ; la résine et le catalyseur doivent être dosés avec précision et bien mélangés pour garantir des temps de

durcissement corrects ; la toxicité et l'inflammabilité de la résine constituent un problème de sécurité important, notamment en raison du nombre élevé de manipulations manuelles et de l'application finale du produit ; de plus, la rugosité et les détails de surface peuvent être acceptables sur une surface moulée, mais très médiocres sur la surface opposée. [139].

Dans ce procédé, la résine et les fibres sont durcies dans un moule ouvert.

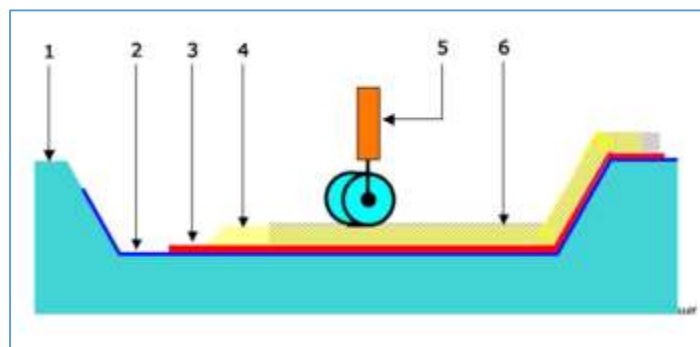


Figure I-8 Procédé de stratification à la main (Schéma simplifié du procédé de moulage au contact : 1 moule, 2 agent de démoulage, 3 revêtement en gel, 4 résine avec fibres, 5 rouleau éboueur, 6 matériau composite) [138].

I.9.2 Technique de moulage fermé

Au cours de ce processus, la résine et les fibres sont durcies à l'intérieur du moule.

I.9.2.1 Moulage par centrifugation

La technique du moulage par centrifugation, aussi appelée moulage par rotation, rotomoulage, moulage par rotation ou moulage par co-rotation. Il existe des composites renforcés de fibres qui peuvent être produits en faisant tourner un mélange de brins coupés et de résine catalysée à l'intérieur d'un mandrin creux, comme le montre la Figure I-9. Parmi les avantages du moulage par centrifugation, citons sa capacité à produire des pièces creuses de formes complexes ; le moule et la machine sont simples et peu coûteux ; le procédé à basse pression permet d'utiliser des moules à paroi mince et à faible résistance ; il est possible de produire simultanément des pièces de différentes tailles sur la même machine ; des inserts métalliques de grande taille, des graphiques, des surfaces et des textures peuvent être moulés directement dans les pièces avec un taux de déchets généralement très faible puisque tous les matériaux sont consommés pour fabriquer la pièce. Par ailleurs, ce processus présente certains inconvénients : il ne convient pas aux très grandes séries de production de petites pièces ; la sélection des matériaux est relativement limitée [138,140] ; les temps de cycle sont comparativement plus longs car le moule doit être chauffé puis refroidi ; le chargement et le déchargement du moule

nécessitent une main-d'œuvre importante ; il peut être difficile de produire de grandes surfaces planes, des bossages, des nervures et de respecter les tolérances dimensionnelles [138]. Jamaludin et al. [140] ont fabriqué des tubes cylindriques en composite polymère renforcé de fibres naturelles à gradient fonctionnel (FGNF/époxy) par la méthode de moulage centrifuge horizontal. Pour ce travail, la fibre de noix de coco a été mélangée avec de l'époxy ; afin d'obtenir quatre compositions différentes : 0%, 5%, 10% et 15%. Les fibres ont subi un traitement chimique au NaOH durant 24 heures avant d'être mélangées à l'époxy par moulage centrifuge. Plus la quantité de fibres naturelles est importante, plus la densité du matériau diminue, en passant de 1,1782 à 1,1656 (g/cm^3) sous la charge maximale. La résistance à la compression et la dureté augmentent avec le renforcement des fibres naturelles de 66,25HD à 84HD à 5%, pour la dureté et de 15 à 33,631 MPa, mais elle a légèrement diminué avec la charge de fibres supplémentaires, ce qui a été attribué à l'augmentation de la porosité [140].

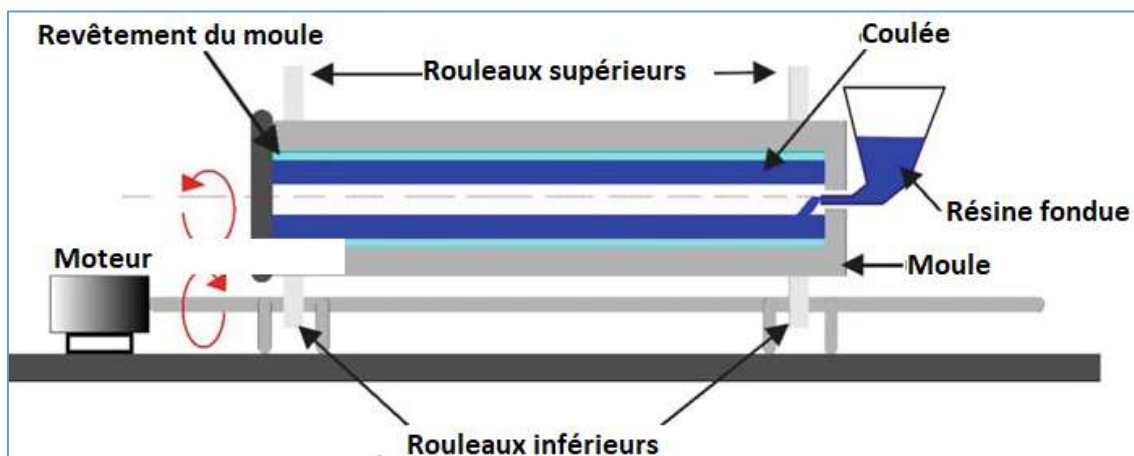


Figure I-9 Procédé de coulée par centrifugation [140].

I.9.2.2 Moulage par compression

Une certaine quantité de matière plastique brute non polymérisée est insérée dans un moule chauffé, qui est ensuite fermé sous pression, poussant la matière dans toutes les zones de la cavité à mesure qu'elle fond, comme le montre la Figure I-10. Une variation du poids de la charge de matière première entraîne une variation de l'épaisseur de la pièce et des déchets ; il est possible que l'air soit piégé ; les contraintes internes sont minimales ; les dimensions dans le sens de l'ouverture du moule et la densité du produit auront tendance à varier davantage que celles perpendiculaires à l'ouverture du moule. La surface est bien traitée et la rugosité de la surface dépend de l'état du moule, en général, on obtient $0,8 \mu\text{m}$. [139].

Yang et al. [83] ont examiné les performances thermiques et mécaniques de biocomposites unidirectionnels à base de fibres de bambou renforcées avec de la résine époxy par la méthode de stratification manuelle suivie d'un moulage par compression en choisissant différentes fractions volumiques de fibres (0% à 70%). La stabilité thermique des biocomposites à base de fibres de bambou et de résine époxy est meilleure que celle de la résine pure. Le module de stockage de la résine est de 2,5 GPa mais lorsqu'il est renforcé, il augmente jusqu'à 9,7 GPa à l'ajout maximum de charge. Ce phénomène d'augmentation du module de stockage avec l'augmentation de la teneur en fibres indique que la rigidité du biocomposite est améliorée. La valeur du module de perte des biocomposites est bien plus élevée que celle de la résine pure, et le pic du module de perte augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres. En outre, la résistance à la traction augmente de 21,0 à 134,3 MPa en augmentant la teneur en fibres de 0 à 70%. En raison de l'amélioration des performances mécaniques, les biocomposites à base d'époxy pourraient être largement employés dans des applications pratiques [83].

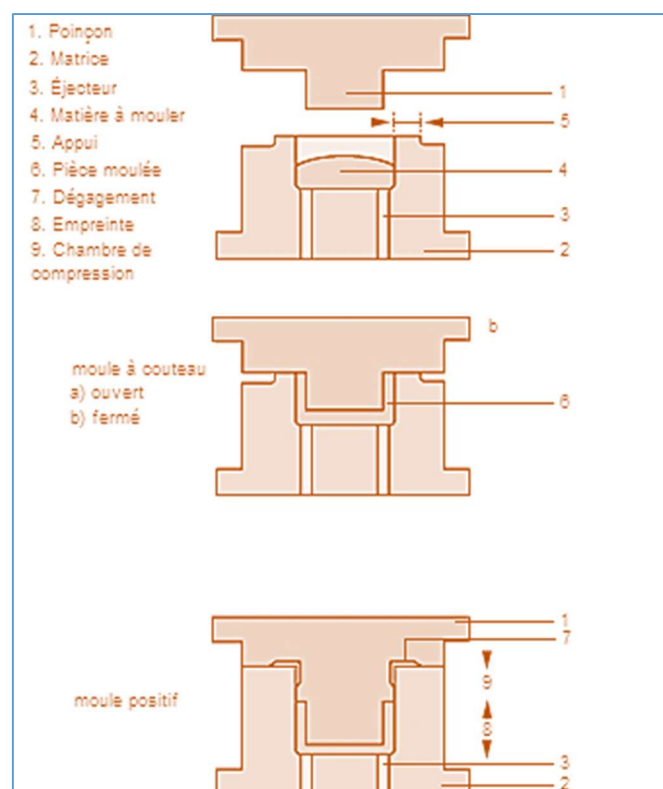


Figure I-10 Procédé de moulage par compression [139,141].

I.9.2.3 Vacuum Infusion

Le procédé d'infusion sous vide est aussi connu sous le nom d'infusion de film de résine. Ce procédé consiste en l'absorption de la matrice par le vide à travers un moule dans lequel les renforts, des fibres naturelles, sont déjà placés et pré-orientés, comme le montre la Figure I-11.

Ce procédé d'infusion sous vide est très utilisé pour la fabrication de pièces de grandes dimensions [139,141] puisqu'il facilite une meilleure adhésion interfaciale entre les fibres et les différentes phases de la matrice qui, par conséquent, permet d'obtenir un matériau composite aux propriétés mécaniques exceptionnelles.

Bosquetti et al. [142] ont étudié à travers la méthode de traitement par infusion sous vide l'évaluation de la résistance mécanique de panneaux composites renforcés de fibres de sisal et de polyuréthane. La résistance à la traction des plaques a donné des valeurs de 146,34 MPa, 9,19 MPa et 15,87 MPa pour les plaques alignées, à une couche et à trois couches, respectivement. Lorsque les fibres étaient alignées par rapport à la charge, elles étaient chargées de supporter la charge appliquée, d'où une meilleure résistance. Lorsque les fibres sont placées dans la direction opposée à celle de la charge, la résistance du composite est réduite, ce qui entraîne une diminution de sa résistance ultime. Les biocomposites avec une couche de tissu et trois couches ont montré une résistance à la traction de 9,19 MPa pour une couche et de 15,87 pour trois couches [142].

Sarifuddin et al. [143] ont étudié les performances mécaniques de biocomposites hybrides de kenaf/carbone avec de la résine époxy, produits par la technique d'infusion sous vide pour examiner l'effet de différentes charges de ces fibres naturelles dans la matrice. La présence de fibres de kenaf dans le biocomposite améliore son allongement à la rupture, ce dernier étant le plus élevé à 25 % en volume de fibres de kenaf. En comparaison avec la fibre de carbone, la fibre de kenaf offre une bonne rigidité, ce qui influence son allongement à la rupture [143].

Aisyah et al. [144] ont analysé au moyen de la technique d'infusion sous vide les effets de l'hybridation des fibres de carbone sur les propriétés thermiques des biocomposites époxy renforcés de kenaf tissé. En effet, dans ce travail, un biocomposite hybride avec une plus grande teneur en fibres de kenaf avait une meilleure stabilité thermique avec une température de décomposition plus élevée, indiquée par la DSC, conduisant à une stabilité thermique plus importante que celle du composite en fibres de carbone pures [144].

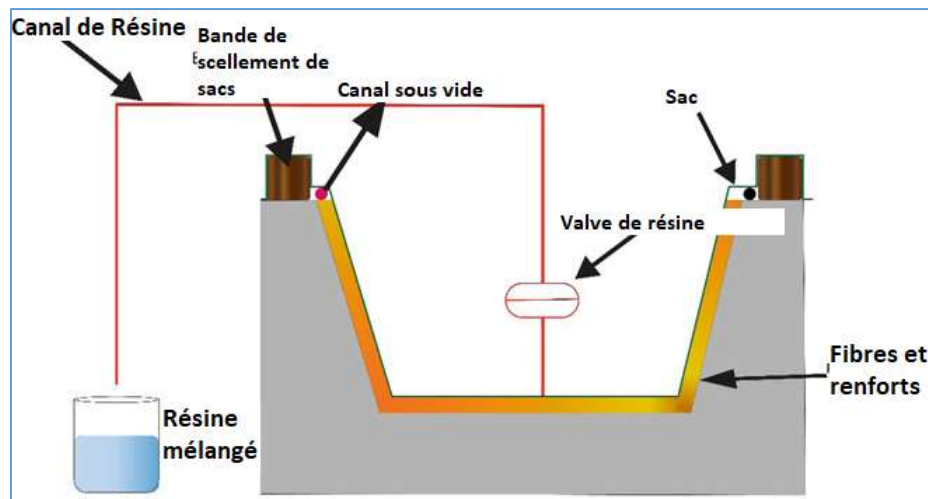


Figure I-11 Procédé d'infusion sous vide [139,141].

I.9.2.4 Moulage par transfert de résine (Resin Transfer Moulding-RTM)

Le procédé de moulage par transfert de résine (RTM) consiste à injecter de la résine sous pression à l'aide d'un équipement d'injection dans la cavité du moule, dans laquelle les matériaux de renforcement secs sont déjà disposés et pré-orientés. Le RTM est effectué à température ordinaire avec des durées aux cycles rapides. Une des caractéristiques de la RTM réside dans sa faible pression d'injection [139,141]. Parmi les avantages du RTM, on peut citer la possibilité de produire des pièces de grande taille, une bonne tolérance dimensionnelle, un faible coût de l'équipement de production, la possibilité de produire des pièces avec des inserts, des cycles de production courts, la possibilité d'automatiser le processus, la possibilité de travailler avec différents types de résine, la capacité de faire varier la fraction volumétrique des composites, une faible émission de solvant (le procédé fonctionne dans un moule fermé), provoquant un faible impact environnemental. La Figure I-12 présente un schéma du procédé RTM. Mbakop et al. [145] ont étudié l'effet du paramétrage de compression sur la perméabilité de la préforme et les propriétés mécaniques des biocomposites unidirectionnels en fibres de lin obtenus par RTM. Dans ces renforts, les filaments de fibres unidirectionnelles ont été maintenus en place par une fine couche de matelas de fibres de lin courtes. Avant de procéder aux tests de perméabilité, les renforts ont été compactés à sec ou à l'état humide, à température constante ou élevée. Le compactage à chaud et humide n'altère pas la perméabilité du renforcement UD lin/mat. La plus faible valeur de résistance à la traction des échantillons non compactés et compactés suivis d'un séchage à température ambiante était de 280 MPa et 290 MPa, respectivement. Alors que, les échantillons compactés à 100 °C sans humidité et compactés par

voie humide à 23 °C et 100 °C ont affiché les valeurs les plus élevées de résistance à la traction, soit 340, 350 et 360 MPa, respectivement [145].

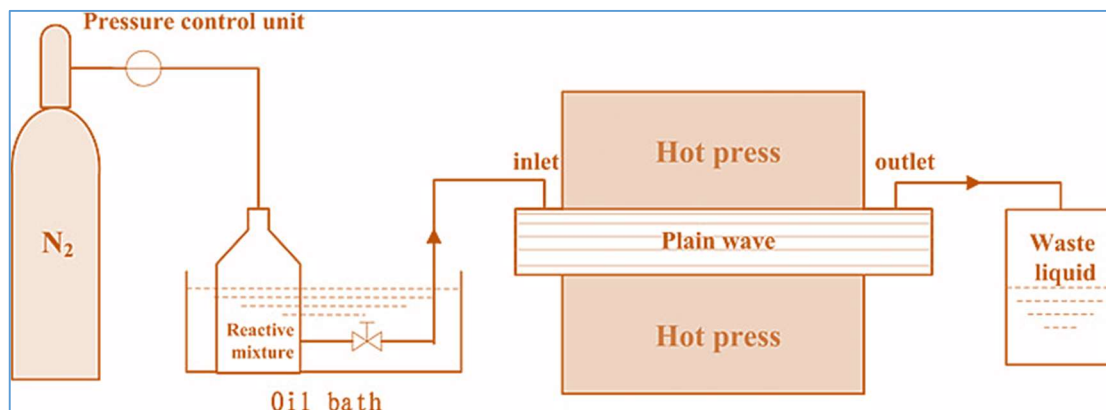


Figure I-12 Procédé de moulage par transfert de résine mis au point par Gong et al. [146].

I.9.2.5 Le moulage par injection

Ce procédé peut être appliqué à des polymères thermoplastiques et thermodurcissables. Les composites sont introduits dans un baril chauffé, mélangés et injectés dans la cavité du moule, où ils refroidissent et durcissent jusqu'à la configuration de la cavité du moule (Figure I-13) [139,141]. Parmi les principaux avantages du moulage par injection, on peut citer des taux de production élevés, des niveaux de tolérance élevés et reproductibles, une grande variété de matériaux, des surfaces très précises, un faible coût de la main-d'œuvre, peu de pertes au niveau des déchets et un faible besoin de finition des pièces après le moulage. Correa-Aguirre et al. [147] ont étudié le comportement des biocomposites polypropylène renforcé par des fibres de bagasse traitées chimiquement ou non. Ces biocomposites ont été recyclés cinq fois en utilisant le procédé d'extrusion, suivi d'un moulage par injection après chaque cycle de recyclage. Selon les propriétés mécaniques, l'ajout de microfibrilles de bagasse et les traitements chimiques génèrent des améliorations des propriétés mécaniques. Lors du premier cycle de traitement, le module de flexion des biocomposites PP/Bagasse et de 2069 MPa et PP-Bagasse-traitées NaOH et de 1847 MPa, est augmenté de 60% et 42% par rapport au PP pur (1296 MPa). Par ailleurs, les valeurs de résistance à la flexion ont augmenté pour le PP/Bagasse (48 MPa) et le PP-Bagasse-traitées NaOH (43,3 MPa), de 20% et 8% par rapport au PP pur (40 MPa). Concernant le troisième cycle de traitement, tous les résultats du module de flexion et de la résistance à la flexion des biocomposites présentaient des différences significatives par rapport à la valeur du module de flexion de la matrice en PP pur. Enfin, au dernier cycle, aucune différence

significative n'a été détectée entre les biocomposites en ce qui concerne le module de flexion et la résistance à la flexion.

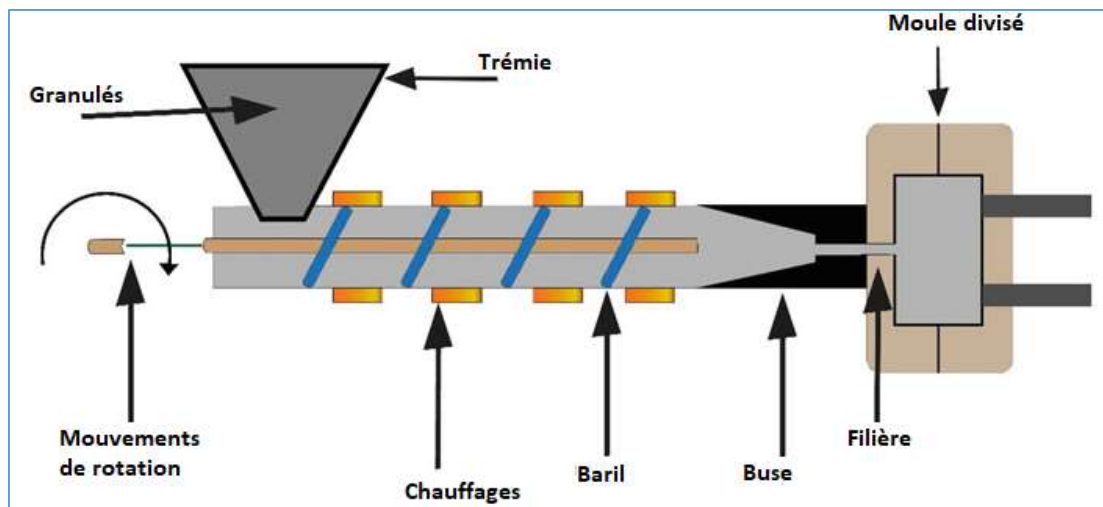


Figure I-13 Procédé de moulage par injection [139].

I.9.2.6 Extrusion

Le procédé d'extrusion (Figure I-14) à une ou deux vis est le principal procédé industriel permettant de mélanger des fibres naturelles à des polymères [148]. Dans ce procédé, les matières plastiques sont continuellement fondues et pressées sous forme de masse visqueuse à partir d'une chambre de pression à travers une filière de moulage. Le composé de moulage est un granulé ou une poudre, qui est plastifié et compacté. La pièce comprimée finie est refroidie à l'étape suivante par de l'eau ou de l'air pour qu'elle durcisse. Les avantages de ce procédé sont : faible coût par pièce ; flexibilité de fonctionnement ; dans l'extrusion à chaud, les modifications post-exécution sont faciles car le produit est encore chauffé, fonctionnement continu ; volumes de production élevés ; de nombreux types de matières premières peuvent être utilisés ; bon mélange ; la finition de surface obtenue est bonne et les bonnes propriétés mécaniques obtenues dans l'extrusion à froid sont quelques avantages du procédé d'extrusion.

Munde et al. [149] ont étudié l'effet du chargement en fibres de sisal sur les propriétés mécaniques, morphologiques et thermiques des biocomposites de PP extrudés. Une augmentation du module de traction de 760,5 MPa à 1009 MPa pour une charge de fibre de 10 % en poids, par rapport au PP pur, soit une amélioration de 33 %. Après l'ajout de fibres à 20 et 30 % en poids, le module de Young a augmenté de 105 et 153 %, respectivement, en raison de l'interaction interfaciale plus importante entre la fibre et le polymère. L'analyse thermique montre une amélioration considérable de la stabilité thermique du composite par rapport au PP

pur. L'amélioration maximale de 15,38% de la température de décomposition est observée pour une fraction pondérale de 20% de fibres de sisal [149].

Teixeira et al. [150] ont étudié l'impact de la teneur et de la longueur des fibres de *curauá* sur le comportement mécanique des composites de cimentation extrudés. La teneur en fibres a directement influencé les performances mécaniques et les fibres avec des longueurs plus importantes qui ont présenté de meilleurs résultats mécaniques pour le module de rupture et l'énergie de rupture. Ces résultats ont démontré que les fibres *curauá* après 200 cycles de vieillissement accéléré étaient meilleures par rapport aux biocomposites à 7 jours, en raison de l'hydratation du ciment, qui a rempli les pores, densifié sa structure et amélioré la zone de transition de la matrice des fibres. [150].

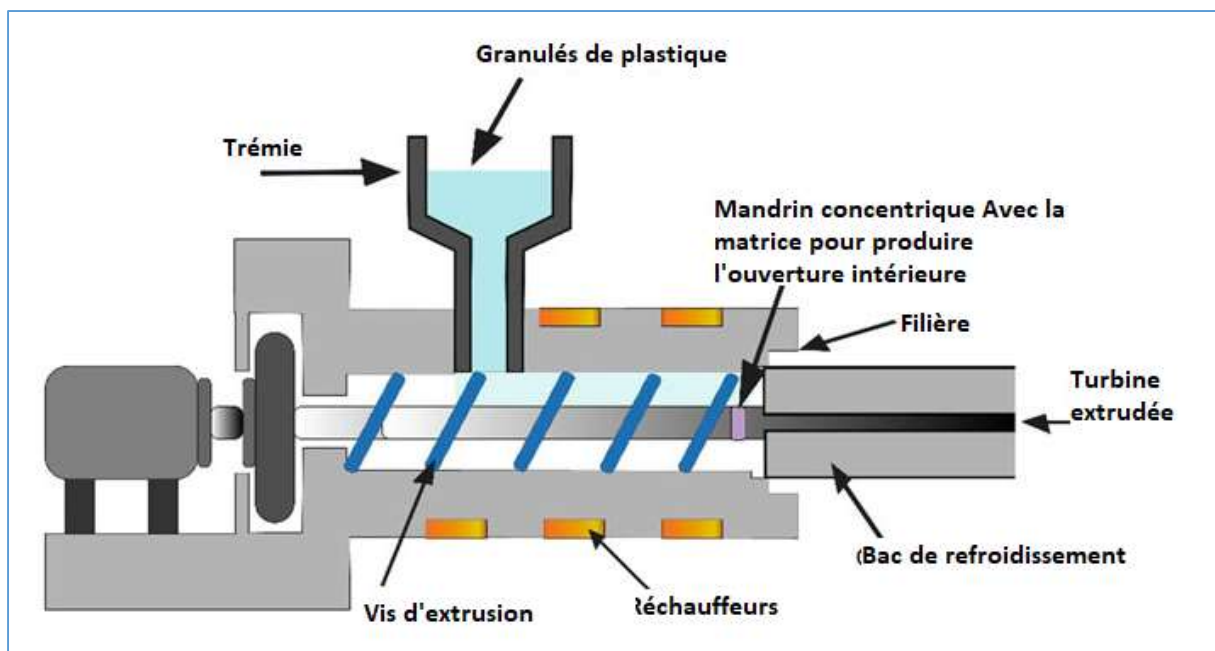


Figure I-14 Procédé d'extrusion [148].

I.10 Usinage des biocomposites

Les fibres naturelles ont des caractéristiques uniques telles que leur rentabilité, leur respect de l'environnement et leurs avantages techniques, qui les rendent substituables aux fibres artificielles [151]. Les fibres naturelles proviennent essentiellement de plantes ; elles sont donc disponibles dans le monde entier à un faible coût. Les propriétés spécifiques élevées dues à leur faible densité en font des renforts alternatifs aux renforts conventionnels tels que le verre [152][153][154]. Les 8,7 millions de tonnes du marché mondial sont occupées par les composites polymères renforcés de fibres de verre, soit 87% de la consommation totale [155].

Les fibres naturelles peuvent conquérir ce marché. La classification des fibres naturelles utilisées dans les composites peut être faite en fonction des différentes sources telles que les fibres libériennes (jute, lin, chanvre et kenaf), les fibres de feuilles (sisal, banane, PALF et abaca), les fibres de graines (coton, kapok, loofah et lait), les fibres d'herbe/de graine (bambou, bagasse et maïs) et les autres fibres (coco, bois, huile de palme, cheveux et laine) [156][157][158][159]. Le perçage devient indispensable pour faciliter l'assemblage des pièces [160].

Le perçage des composites polymères renforcés de fibres (FRPCs) est plus complexe que celui des métaux car le foret doit opérer alternativement sur le renforcement et la matrice, et les deux ont des propriétés uniques [161]. Le délaminage est le principal problème des FRPC, qui se produit en raison de la structure abrasive, dure, hétérogène et anisotrope des fibres [162]. Le délaminage influence la précision des dimensions et la finition de la surface du trou, ce qui entraîne le rejet de 60 % des pièces au stade de l'assemblage [163]. Il existe de nombreux problèmes vitaux dans les FRPCs concernant le perçage, tels que la friture de la fibre, l'écaillage, le déchiquetage, le décollement de la fibre/matrice, la perte de résine, la fibre non coupée et la rupture de la fibre par rapport aux matériaux conventionnels [164][163]. Le délaminage du trou peut être atténué par l'optimisation des paramètres du processus de perçage, ce qui permet d'obtenir une meilleure qualité de trou [165][166]. Bien que de nombreux articles de synthèse aient été consacrés aux opérations d'usinage et aux problèmes des FRPC, qui sont pour la plupart constitués de fibres synthétiques, seuls quelques-uns d'entre eux ont porté sur les composites polymères renforcés de fibres naturelles (NFRC). Lotfi et al. [167] ont étudié les matériaux, la fabrication et l'usinabilité des NFRC. Ils ont déterminé que le perçage mécanique traditionnel est rentable et pratique. La qualité du perçage pourrait être améliorée en utilisant un diamètre inférieur de l'outil de perçage, une vitesse plus élevée et une avance plus faible [168]. La surface et la sous-surface des biocomposites ont été considérablement endommagées par le perçage [169][170] ont examiné le perçage des NFRC et ont analysé l'importance du foret et des paramètres de perçage, ce qui a conduit à l'intégrité structurelle des composites.

I.10.1 Techniques de perçage

Malgré le développement de diverses techniques de perçage non conventionnelles, par exemple, l'usinage au laser [171][172], l'usinage par jet d'eau [173][174][175], l'électrochimie, l'électro-décharge et la décharge électrochimique pour réaliser les trous des composites, les

méthodes de perçage mécaniques conventionnelles sont toujours utilisées comme principales applications des NFRC (Tableau I-6). Ces méthodes sont principalement le perçage radial, les centres d'usinage verticaux, les centres d'usinage verticaux CNC et les fraiseuses.

I.10.1.1 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)) [176] [177] [161][178][179][180][181][182][183][169], 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. [184][185][186][187][188][189].
3. Impact du matériau et de la géométrie de l'outil sur la TF et la qualité du trou : Les études [190][191][192][193][185][194][195][196][197]; 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 [194][186][198] 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.10.1.2 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 [199][200]. 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. [172] 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. [171] sur un composite hybride basalte/époxy renforcé par des fibres de verre en utilisant une machine laser (Figure I-15a). 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-15a). Les conditions d'optimisation étaient de 0,663 (circularité du trou) et 72,695 μm (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 [201][193]. Ces problèmes d'usinage peuvent être résolus par l'AWJM, qui est 10 fois plus rapide que les techniques d'usinage conventionnelles [202]. Ce procédé de perçage ne génère pas de copeaux et ne provoque pas de délaminage plastique [203]. 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 [204]. Il y a plusieurs études [174][205][173][175] disponibles dans la littérature qui ont montré la capacité de l'AWJM pour l'usinabilité des NFRC. Dhakal et al. [174] ont effectué le perçage de composites lin/époxy, carbone/époxy, hybride lin/carbone/époxy. La Figure I-16 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.10.2 Paramètres du perçage

Les paramètres sont essentiels pour le perçage des NFRC car la sélection des paramètres affecte la performance du perçage. En général, les principaux paramètres d'entrée du perçage sont la géométrie et le matériau du trou, le diamètre de l'outil, la vitesse de coupe et l'avance. Les paramètres de sortie sont 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 I-7](#), les conditions d'optimisation (variables soulignées), le DF le plus faible a été trouvé à une avance plus faible et une vitesse de coupe plus élevée. Par contre, la TF, le couple et l'usure de l'outil étaient plus élevés à des avances plus importantes. Le foret hélicoïdal a été le choix le plus courant des chercheurs, avec des outils de perçage spéciaux pour une excellente performance du perçage. Habituellement, la plage de vitesse de coupe était de 500 à 2800 tr/min lors du processus de perçage ordinaire. Certaines études [\[178\]\[187\]\[206\]](#) ont porté sur le perçage à des vitesses plus élevées (3000-9000 tr/min). Le principal problème du perçage à une vitesse plus élevée est l'usure plus importante de l'outil et la température de coupe. Cependant, les NFRC ont montré une usure d'outil plus faible par rapport aux composites à fibres synthétiques en raison de l'abrasivité plus faible des fibres naturelles. L'usure peut être minimisée par l'utilisation de forets revêtus, et des réfrigérants peuvent être appliqués pour réduire la température pendant le perçage des NFRC.

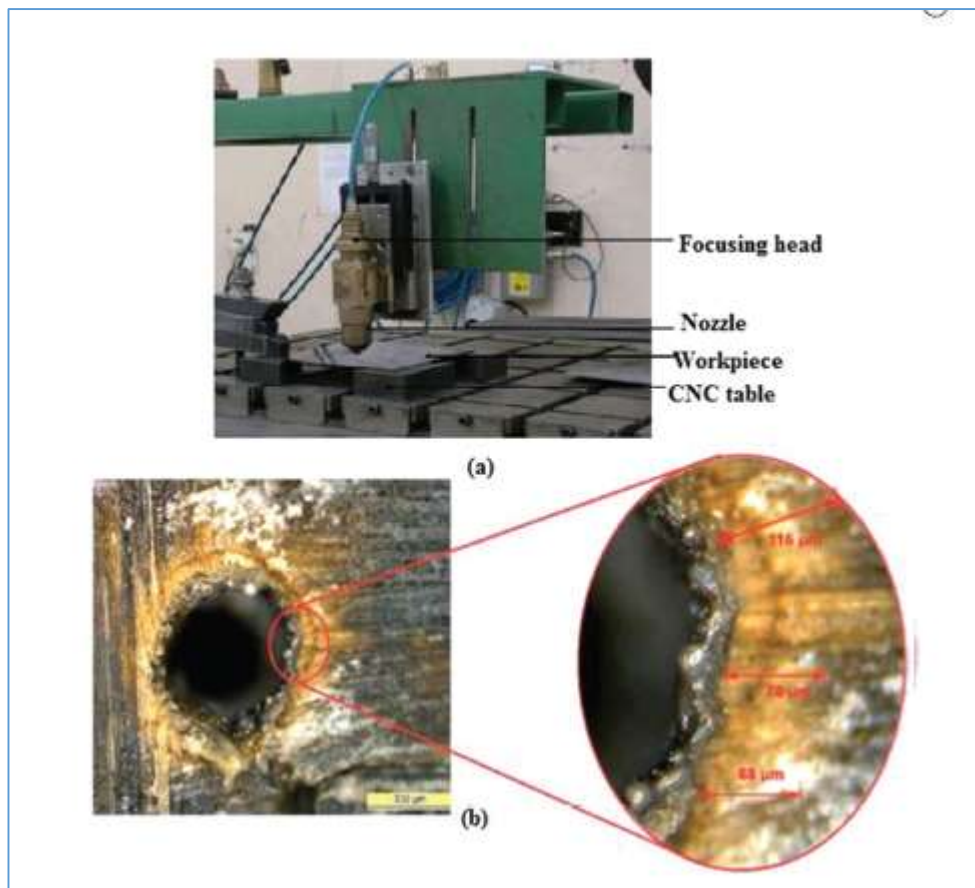


Figure I-15 (a) Montage expérimental d'un laser Nd-YAG, (b) zone affectée par la chaleur pour un courant de lampe de 180 ampères, une fréquence d'impulsion (30 Hz) et une pression d'air (8 bars), [171].

I.10.3 Mesures des paramètres de performance du perçage

Dans cette section, les paramètres les plus critiques, tels que le facteur de délaminage, la force de poussée et la résistance résiduelle pour l'analyse de la performance du perçage pour les NFRC, sont discutés en détail.

I.10.3.1 Délaminage

Le délaminage se produit généralement à l'entrée et à la sortie d'un trou dans les composites. Elle peut être classée en deux catégories : pelage et poussée, selon le mécanisme de formation du délaminage. La délamination à l'entrée du trou de perçage est généralement appelée "peel-up" et "push-up" pour la délamination à la sortie du trou. La figure I-17 (a-d) montre les morphologies du délaminage typique autour du trou à l'entrée et à la sortie du composite époxy renforcé de fibres de jute [182]. Le délaminage par poussée à la sortie du trou

est dû à l'arrachement des fibres. Díaz-Álvarez et al. [194] ont rapporté la formation d'un délaminage par poussée d'un composite polymère à fibres de lin pour différentes tailles de diamètres de trous.

La principale raison de ce type de délaminage est le décollement de la matrice de fibres, qui permet à la fibre de sortir et de laisser un paquet de fibres cisailées sur la surface du trou percée pendant le perçage. La [Figure I-17](#) montre clairement que le choix des outils de perçage est essentiel pour minimiser le délaminage [207]. Le mécanisme de formation du délaminage par pelage et décollement peut être lié à l'angle d'hélice, à la forme de la cannelure et au couple du foret [162]. Une force de pelage est développée à travers la pente de la cannelure, lorsque l'outil de perçage entre en contact avec le composite. Elle sépare les plis supérieurs du composite, ce qui conduit au délaminage via une fracture en mode III en termes de fissure de cisaillement par arrachement. Ensuite, les franges des fibres sont tirées vers le haut et provoquent un délaminage selon le modèle I sous la forme d'une fissure d'ouverture. D'autre part, le pushout est associé à la TF, aux conditions du processus de perçage et à la qualité de l'interface du composite. Les plis non coupés sous la foreuse deviennent susceptibles de se déformer lorsque l'outil entre en contact avec la sortie du trou. Ainsi, le délaminage par poussée se produit lorsque la contrainte entre les couches dépasse la résistance à la flexion entre les couches en raison de la diminution de l'épaisseur du composite. Par conséquent, le délaminage par poussée est plus grave que le délaminage par arrachement. D'autres types de délaminage ont été découverts par certains chercheurs, tels que la formation de bavures autour du trou [207], la flexion des fibres, les fibres non coupées, le décollement de la matrice de fibres, le maculage du polymère et la protrusion des fibres [193].

Le facteur de délaminage, DF, est une variable cruciale pour examiner la qualité du trou de perçage. Il existe plusieurs méthodes pour calculer le délaminage autour du trou d'endommagement pour les FRPC. Le [Tableau I-7](#) décrit les différentes approches qui ont été utilisées par plusieurs chercheurs pour calculer le DF pour les NFRC. Elles sont les plus populaires parmi les chercheurs pour calculer le DF. Il est clair qu'il y a un manque de cohérence et d'accord commun. Par conséquent, il est nécessaire d'établir une méthode standard pour déterminer le DF. Cependant, la plupart des chercheurs n'ont pas tenu compte de la contribution de l'endommagement, de la longueur maximale de la fissure et de la fissure fine lors du calcul du DF. L'acquisition et le traitement d'images sont des techniques standard utilisées pour inspecter la qualité des trous des NFRC ([Figure I-17](#)). Elles sont cruciales pour une compréhension complète de la forme, de la taille et de l'emplacement de la délamination. Les

différentes méthodes d'acquisition d'images, principalement des méthodes de mesure non destructives comme la microscopie

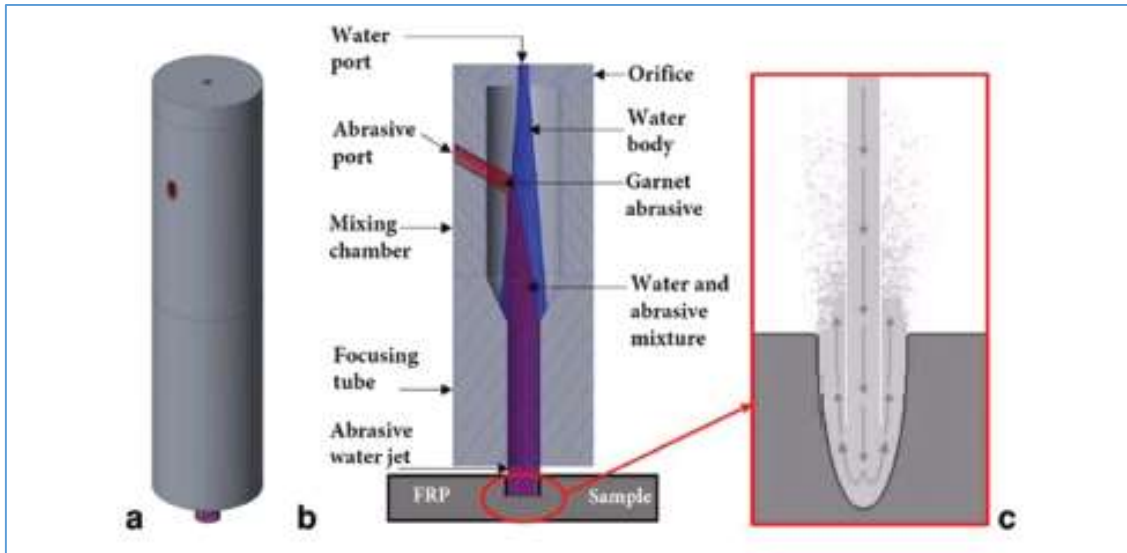


Figure I-16 (a) buse d'injection de l'AWJ, les caractéristiques de section ou la géométrie interne de la buse, le mélange de l'eau et de l'abrasif pour l'action de perçage, (b) les effets de la vitesse de déplacement de l'AWJ sur les dommages causés par la délamination (c) sur la rugosité de surface. [174].

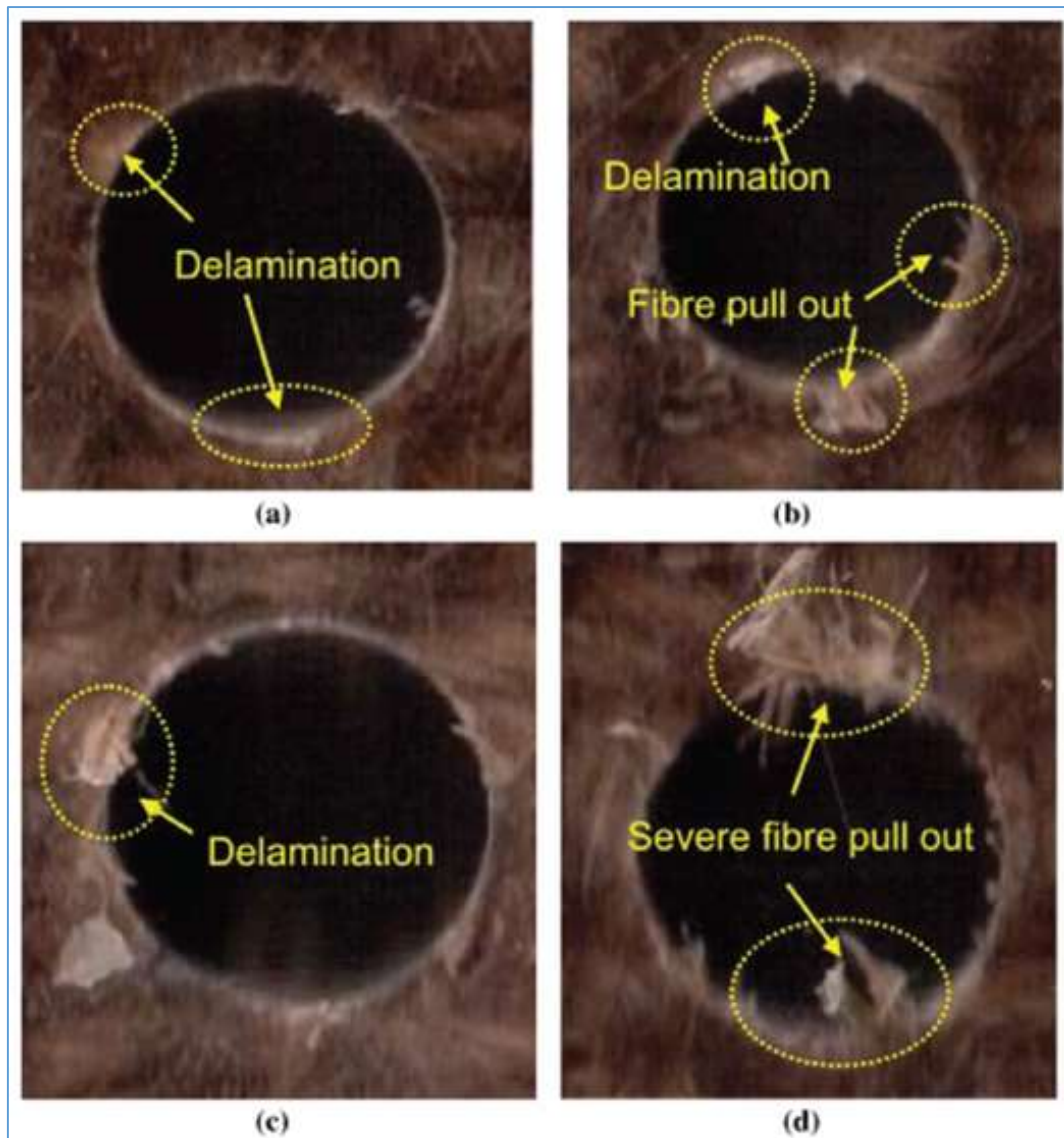


Figure I-17 quelques types des zones endommagées lors du perçage de l'UT-JFRP (a, c) entrée, et (b, d) sortie [182].

Tableau I-6 Plusieurs procédés de perçage pour les NFRC rapportés dans la littérature.

Procédé de perçage	Remarques	Références
Conventionnel		
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).	[176][208][193][189][197]
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.	[194][209][207]
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°.	[169][182][181][210][211][212][178][213][206][187]
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	[186][191][183][183]
Non conventionnel		
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.	[171][172]
Perçage par jet d'eau abrasif	Abrasif : eau et particules de grenat et Diamètre de la buse : 0,76 mm	[173][174][175]

Tableau I-7 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.	[182][214][183][176][177][197][191][181]
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.	[160]
Facteur du délaminage (Fd)	$Fd = A_{max}/A_{trou}$, ou A_{max} et A_{trou} sont respectivement la surface maximale et la surface initiale du trou	[208]

I.11 Conclusion

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. Ces aspects deviennent de plus en plus pertinents dans le contexte de la crise écologique actuelle dans le monde. Le présent chapitre expose une synthèse bibliographique effectuée en vue de se familiariser avec les matériaux biocomposites et les fibres naturelles. L'objectif est de pouvoir constituer une base de connaissances qui pourra être exploitée par la suite pour la sélection des différents matériaux nécessaires à la réalisation d'un produit à base de constituants naturels. Tout d'abord, les concepts et définitions principaux relatifs aux fibres naturelles sont rappelés. Puis, les matériaux biocomposites sont définis, ainsi que les différents éléments qui les composent. De nombreux types de fibres végétales, ainsi que différentes matrices et notamment des matrices polymères. Par ailleurs, plusieurs techniques de fabrication sont présentées. Une brève synthèse de la littérature concernant spécifiquement les renforts et matrices polymères est présentée. Ensuite, quelques travaux bibliographiques sont présentés sur le comportement en usinabilité des biocomposites renforcés de fibre végétales.

I.12 Références

- [1] N. Ramli, N. Mazlan, Y. Ando, Z. Leman, K. Abdan, A.A. Aziz, N.A. Sairy, Natural fiber for green technology in automotive industry: A brief review, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 368 (2018) 12012. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/368/1/012012>.
- [2] T. Rohan, B. Tushar, M. G T, Review of natural fiber composites, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 314 (2018) 12020. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/314/1/012020>.
- [3] 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>.
- [4] V.K. Balla, K.H. Kate, J. Satyavolu, P. Singh, J.G.D. Tadimetri, Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects, *Compos. Part B Eng.* 174 (2019) 106956. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106956>.
- [5] 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>.
- [6] C. Santulli, 12 - Natural fiber-reinforced composites: Recent developments and prospective utilization in railway industries for sleeper manufacturing, in: D. Verma, E. Fortunati, S. Jain, X.B.T.-B. Zhang Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy (Eds.), Woodhead Publ. Ser. Compos. Sci. Eng., Woodhead Publishing, 2019: pp. 225–238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102426-3.00012-6>.
- [7] T. Peijs, Natural Fiber Based Composites, *Mater. Technol.* 15 (2000) 281–285. <https://doi.org/10.1080/10667857.2000.11752892>.
- [8] M.S. HUDA, L.T. DRZAL, D. RAY, A.K. MOHANTY, M. MISHRA, 7 - Natural-fiber composites in the automotive sector, in: K.L.B.T.-P. and P. of N.-F.C. Pickering (Ed.), Woodhead Publ. Ser. Compos. Sci. Eng., Woodhead Publishing, 2008: pp. 221–268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845694593.2.221>.
- [9] L. Mishnaevsky, K. Branner, H.N. Petersen, J. Beauson, M. McGugan, B.F. Sørensen, Materials for Wind Turbine Blades: An Overview, *Mater.* . 10 (2017). <https://doi.org/10.3390/ma10111285>.
- [10] G.M. Singh Rajeshwar, Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites, CRC Press, 2005. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9780203508206>.
- [11] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 575–581. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>.
- [12] C. Galan-Marin, C. Rivera-Gomez, A. Garcia-Martinez, Use of Natural-Fiber Bio-Composites in Construction versus Traditional Solutions: Operational and Embodied Energy Assessment, *Mater.* . 9 (2016). <https://doi.org/10.3390/ma9060465>.
- [13] A.A. Maan, A. Nazir, M.K.I. Khan, T. Ahmad, R. Zia, M. Murid, M. Abrar, The therapeutic properties and applications of Aloe vera: A review, *J. Herb. Med.* 12 (2018) 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hermed.2018.01.002>.
- [14] M.S. Singhvi, S.S. Zinjarde, D. V Gokhale, Polylactic acid: synthesis and biomedical applications, *J. Appl. Microbiol.* 127 (2019) 1612–1626. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jam.14290>.
- [15] B.A. Khan, J. Wang, P. Warner, H. Wang, Antibacterial properties of hemp hurd powder against E. coli, *J. Appl. Polym. Sci.* 132 (2015). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.41588>.
- [16] A.B. Moghaddam, B. Shirvani, M.A. Aroon, T. Nazari, Physico-chemical properties of hybrid electrospun nanofibers containing polyvinylpyrrolidone (PVP), propolis and aloe vera, *Mater. Res. Express.* 5 (2018) 125404. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aae0bf>.
- [17] E. Nazarzadeh Zare, P. Makvandi, F.R. Tay, Recent progress in the industrial and biomedical applications of tragacanth gum: A review, *Carbohydr. Polym.* 212 (2019) 450–467. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.076>.
- [18] W. He, R. Benson, 4 - Polymeric Biomaterials, in: K. Modjarrad, S.B.T.-H. of P.A. in M. and M.D. Ebnesajjad (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>.
- [19] A.K. Bledzki, J. Gassan, Composites reinforced with cellulose based fibres, *Prog. Polym. Sci.* 24 (1999) 221–274.
- [20] 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>.
- [21] 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>.

- [22] A. Ramezani Kakroodi, S. Cheng, M. Sain, A. Asiri, Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Nanocomposites Based on Polyvinyl Alcohol and Cellulose Nanofiber from *Aloe vera* Rind, *J. Nanomater.* 2014 (2014) 903498. <https://doi.org/10.1155/2014/903498>.
- [23] K.N. Keya, N.A. Kona, F.A. Koly, K.M. Maraz, M.N. Islam, R.A. Khan, Natural fiber reinforced polymer composites: history, types, advantages and applications, *Mater. Eng. Res.* 1 (2019) 69–85.
- [24] A. Belaadi, A. Bezazi, M. Bourchak, F. Scarpa, Tensile static and fatigue behaviour of sisal fibres, *Mater. Des.* 46 (2013) 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.048>.
- [25] A. Komuraiah, N.S. Kumar, B.D. Prasad, Chemical Composition of Natural Fibers and its Influence on their Mechanical Properties, *Mech. Compos. Mater.* 50 (2014) 359–376. <https://doi.org/10.1007/s11029-014-9422-2>.
- [26] J. Cruz, R. Figueiro, Surface Modification of Natural Fibers: A Review, *Procedia Eng.* 155 (2016) 285–288. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.030>.
- [27] A. Gunge, P.G. Koppad, M. Nagamathu, S.B. Kivade, K.V.S. Murthy, Study on mechanical properties of alkali treated plain woven banana fabric reinforced biodegradable composites, *Compos. Commun.* 13 (2019) 47–51. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coco.2019.02.006>.
- [28] 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>.
- [29] 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.
- [30] L. Zhang, J. Zhong, X. Ren, Natural Fiber-Based Biocomposites BT - Green Biocomposites: Manufacturing and Properties, in: M. Jawaid, S.M. Sapuan, O.Y. Allothman (Eds.), Springer International Publishing, Cham, 2017: pp. 31–70. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46610-1_3.
- [31] 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.
- [32] M. Zimniewska, M. Wladyka-Przybylak, Natural Fibers for Composite Applications BT - Fibrous and Textile Materials for Composite Applications, in: S. Rana, R. Figueiro (Eds.), Springer Singapore, Singapore, 2016: pp. 171–204. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0234-2_5.
- [33] 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>.
- [34] R. Kozłowski, M. Wladyka-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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] A. Orue, A. Eceiza, A. Arbelaiz, Pretreatments of Natural Fibers for Polymer Composite Materials BT - Lignocellulosic Composite Materials, in: S. Kalia (Ed.), Springer International Publishing, Cham, 2018: pp. 137–175. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68696-7_3.
- [38] M.S. Islam, K.L. Pickering, N.J. Foreman, Influence of alkali treatment on the interfacial and physico-mechanical properties of industrial hemp fibre reinforced polylactic acid composites, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 41 (2010) 596–603. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.01.006>.
- [39] M. Aydin, H. Tozlu, S. Kemaloglu, A. Aytac, G. Ozkoc, Effects of Alkali Treatment on the Properties of Short Flax Fiber–Poly(Lactic Acid) Eco-Composites, *J. Polym. Environ.* 19 (2011) 11–17. <https://doi.org/10.1007/s10924-010-0233-9>.
- [40] N. Le Moigne, M. Longerey, J.-M. Taulemesse, J.-C. Bénézet, A. Bergeret, Study of the interface in natural fibres reinforced poly(lactic acid) biocomposites modified by optimized organosilane treatments, *Ind. Crops Prod.* 52 (2014) 481–494. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.022>.
- [41] C. Way, K. Dean, D.Y. Wu, E. Palombo, Biodegradation of sequentially surface treated lignocellulose reinforced polylactic acid composites: Carbon dioxide evolution and morphology, *Polym. Degrad. Stab.* 97 (2012) 430–438. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.11.013>.

- [42] A. Zandi, A. Zanganeh, F. Hemmati, J. Mohammadi-Roshandeh, Thermal and biodegradation properties of poly(lactic acid)/rice straw composites: effects of modified pulping products, Iran. Polym. J. 28 (2019) 403–415. <https://doi.org/10.1007/s13726-019-00709-3>.
- [43] R. Siakeng, M. Jawaid, H. Ariffin, M.S. Salit, Effects of Surface Treatments on Tensile, Thermal and Fibre-matrix Bond Strength of Coir and Pineapple Leaf Fibres with Poly Lactic Acid, J. Bionic Eng. 15 (2018) 1035–1046. <https://doi.org/10.1007/s42235-018-0091-z>.
- [44] D. González, V. Santos, J.C. Parajó, Silane-treated lignocellulosic fibers as reinforcement material in polylactic acid biocomposites, J. Thermoplast. Compos. Mater. 25 (2011) 1005–1022. <https://doi.org/10.1177/0892705711417029>.
- [45] M.S. Huda, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, M. Misra, Effect of chemical modifications of the pineapple leaf fiber surfaces on the interfacial and mechanical properties of laminated biocomposites, Compos. Interfaces. 15 (2008) 169–191. <https://doi.org/10.1163/156855408783810920>.
- [46] C. Way, K. Dean, D.Y. Wu, E.A. Palombo, Polylactic Acid Composites Utilising Sequential Surface Treatments of Lignocellulose: Chemistry, Morphology and Properties, J. Polym. Environ. 19 (2011) 849–862. <https://doi.org/10.1007/s10924-011-0361-x>.
- [47] M. Abu Ghalia, Y. Dahman, 15 - Synthesis and utilization of natural fiber-reinforced poly (lactic acid) bionanocomposites, in: M. Jawaid, P. Md Tahir, N.B.T.-L.F. and B.-B.C.M. Saba (Eds.), Woodhead Publ. Ser. Compos. Sci. Eng., Woodhead Publishing, 2017: pp. 313–345. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100959-8.00015-9>.
- [48] M.E. González-López, A.A. Pérez-Fonseca, E.O. Cisneros-López, R. Manríquez-González, D.E. Ramírez-Arreola, D. Rodrigue, J.R. Robledo-Ortiz, Effect of Maleated PLA on the Properties of Rotomolded PLA-Agave Fiber Biocomposites, J. Polym. Environ. 27 (2019) 61–73. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1308-2>.
- [49] H.E. Desch, J.M. Dinwoodie, Timber: structure, properties, conversion and use, Macmillan International Higher Education, 2016.
- [50] X. Li, A.L.G. Tabil, A.S. Panigrahi, Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites : A Review, (2007) 25–33. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>.
- [51] 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>.
- [52] N. Karthi, K. Kumaresan, S. Sathish, S. Gokulkumar, L. Prabhu, N. Vigneshkumar, An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas, Mater. Today Proc. 27 (2020) 2828–2834. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.011>.
- [53] M.M. Rahman, M.A. Khan, Surface treatment of coir (Cocos nucifera) fibers and its influence on the fibers' physico-mechanical properties, Compos. Sci. Technol. 67 (2007) 2369–2376. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.01.009>.
- [54] Y. Xue, D.R. Veazie, C. Glinsey, M.F. Horstemeyer, R.M. Rowell, Environmental effects on the mechanical and thermomechanical properties of aspen fiber–polypropylene composites, Compos. Part B Eng. 38 (2007) 152–158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.07.005>.
- [55] A.K. Bledzki, H.P. Fink, K. Specht, Unidirectional hemp and flax EP- and PP-composites: Influence of defined fiber treatments, J. Appl. Polym. Sci. 93 (2004) 2150–2156. <https://doi.org/10.1002/app.20712>.
- [56] K. Goda, M.S. Sreekala, A. Gomes, T. Kaji, J. Ohgi, Improvement of plant based natural fibers for toughening green composites—Effect of load application during mercerization of ramie fibers, Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 37 (2006) 2213–2220. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.12.014>.
- [57] R. Ahmad, R. Hamid, S.A. Osman, Physical and Chemical Modifications of Plant Fibres for Reinforcement in Cementitious Composites, Adv. Civ. Eng. 2019 (2019) 5185806. <https://doi.org/10.1155/2019/5185806>.
- [58] S. Mukhopadhyay, R. Figueiro, Physical Modification of Natural Fibers and Thermoplastic Films for Composites — A Review, J. Thermoplast. Compos. Mater. 22 (2009) 135–162. <https://doi.org/10.1177/0892705708091860>.
- [59] F.F. da C. Tavares, M.D.C. de Almeida, J.A.P. da Silva, L.L. Araújo, N.S.M. Cardozo, R.M.C. Santana, Thermal treatment of açai (Euterpe oleracea) fiber for composite reinforcement, Polímeros. 30 (2020).
- [60] D. Sun, Surface Modification of Natural Fibers Using Plasma Treatment, Biodegrad. Green Compos. (2016) 18–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118911068.ch2>.
- [61] M.S. Huda, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, M. Misra, Effect of fiber surface-treatments on the properties of laminated biocomposites from poly(lactic acid) (PLA) and kenaf fibers, Compos. Sci. Technol. 68 (2008) 424–432. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.06.022>.
- [62] P.K. Kushwaha, R. Kumar, Studies on water absorption of bamboo-epoxy composites: Effect of silane treatment of mercerized bamboo, J. Appl. Polym. Sci. 115 (2010) 1846–1852. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.31317>.
- [63] D. Puglia, M. Monti, C. Santulli, F. Sarasini, I.M. De Rosa, J.M. Kenny, Effect of alkali and silane treatments on

- mechanical and thermal behavior of Phormium tenax fibers, *Fibers Polym.* 14 (2013) 423–427.
<https://doi.org/10.1007/s12221-013-0423-x>.
- [64] T.-D. Ngo, Introduction to composite materials, *Compos. Nanocomposite Mater. From Knowl. to Ind. Appl.* (2020).
- [65] Y. Gong, P. Niu, X. Wang, S. Long, J. Yang, Influence of processing temperatures on fiber dimensions and microstructure of polypropylene/hemp fiber composites, *J. Reinf. Plast. Compos.* 31 (2012) 1282–1290.
<https://doi.org/10.1177/0731684412457887>.
- [66] M.A. Sawpan, K.L. Pickering, A. Fernyhough, Improvement of mechanical performance of industrial hemp fibre reinforced polylactide biocomposites, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 42 (2011) 310–319.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.12.004>.
- [67] M. Ramesh, 9 - Hemp, jute, banana, kenaf, ramie, sisal fibers, in: A.R.B.T.-H. of P. of T. and T.F. (Second E. Bunsell (Ed.), *Text. Inst. B. Ser.*, Woodhead Publishing, 2018: pp. 301–325. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101272-7.00009-2>.
- [68] A.K. Bledzki, A. Jazkiewicz, Mechanical performance of biocomposites based on PLA and PHBV reinforced with natural fibres – A comparative study to PP, *Compos. Sci. Technol.* 70 (2010) 1687–1696.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.06.005>.
- [69] Y.-F. Shih, C.-C. Huang, Polylactic acid (PLA)/banana fiber (BF) biodegradable green composites, *J. Polym. Res.* 18 (2011) 2335–2340. <https://doi.org/10.1007/s10965-011-9646-y>.
- [70] A. Sailesh, C. Shanjeevi, J.J. Arputhabalan, Tensile Strength of Banana–Bamboo–Glass Fiber Reinforced Natural Fiber Composites, in: *Appl. Mech. Mater.*, Trans Tech Publ, 2014: pp. 1195–1199.
- [71] S. Serizawa, K. Inoue, M. Iji, Kenaf-fiber-reinforced poly(lactic acid) used for electronic products, *J. Appl. Polym. Sci.* 100 (2006) 618–624. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.23377>.
- [72] N. Saba, M.T. Paridah, M. Jawaid, Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review, *Constr. Build. Mater.* 76 (2015) 87–96. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.043>.
- [73] A. Joshi, P.S. Shivakumar Gouda, S. Savanur, V. Uppin, G.B. Veereshkumar, Influence of Kenaf on Mechanical Properties of Glass Epoxy Composites, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 577 (2019) 12161.
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/577/1/012161>.
- [74] G. Phiri, M.C. Khoathane, E.R. Sadiku, Effect of fibre loading on mechanical and thermal properties of sisal and kenaf fibre-reinforced injection moulded composites, *J. Reinf. Plast. Compos.* 33 (2013) 283–293.
<https://doi.org/10.1177/0731684413511548>.
- [75] B.F. Yousif, H. Ku, Suitability of using coir fiber/polymeric composite for the design of liquid storage tanks, *Mater. Des.* 36 (2012) 847–853. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.01.063>.
- [76] G. Wang, F. Chen, 10 - Development of bamboo fiber-based composites, in: M. Fan, F.B.T.-A.H.S.N.F.C. in C. Fu (Eds.), *Woodhead Publishing*, 2017: pp. 235–255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00010-8>.
- [77] L.D. Goh, A.S. Zulkornain, Influence of bamboo in concrete and beam applications, *J. Phys. Conf. Ser.* 1349 (2019) 12127. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1349/1/012127>.
- [78] H.L. Bos, J. Müssig, M.J.A. van den Oever, Mechanical properties of short-flax-fibre reinforced compounds, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 37 (2006) 1591–1604. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.10.011>.
- [79] E. Bodros, I. Pillin, N. Montrelay, C. Baley, Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications?, *Compos. Sci. Technol.* 67 (2007) 462–470.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.024>.
- [80] M. Shibata, K. Ozawa, N. Teramoto, R. Yosomiya, H. Takeishi, Biocomposites Made from Short Abaca Fiber and Biodegradable Polyesters, *Macromol. Mater. Eng.* 288 (2003) 35–43.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/mame.200290031>.
- [81] T.G. Yashas Gowda, M.R. Sanjay, K. Subrahmanya Bhat, P. Madhu, P. Sentharamaikannan, B. Yogesha, Polymer matrix-natural fiber composites: An overview, *Cogent Eng.* 5 (2018) 1446667.
<https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1446667>.
- [82] 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.
- [83] 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>.
- [84] 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>.

- [85] 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>.
- [86] 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>.
- [87] D. Mahesh, K.R. Kowshigha, N. V Raju, P.K. Aggarwal, Characterization of banana fiber-reinforced polypropylene composites, *J. Indian Acad. Wood Sci.* 17 (2020) 1–8. <https://doi.org/10.1007/s13196-019-00244-x>.
- [88] N. Venkateshwaran, A. ElayaPerumal, A. Alavudeen, M. Thiruchitrambalam, 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>.
- [89] 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>.
- [90] 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>.
- [91] 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>.
- [92] 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>.
- [93] 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>.
- [94] 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>.
- [95] 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>.
- [96] 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.
- [97] 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>.
- [98] 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>.
- [99] 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>.
- [100] 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>.
- [101] 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>.
- [102] 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>.
- [103] 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>.
- [104] 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>.
- [105] S.Q. Shi, L. Cai, Y. Weng, D. Wang, Y. Sun, Comparative life-cycle assessment of water supply 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>.
- [106] 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.
- [107] 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.
- [108] 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>.
- [109] 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>.
- [110] 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>.
- [111] 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.
- [112] 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>.
- [113] 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>.
- [114] 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>.
- [115] 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>.
- [116] 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>.
- [117] 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>.
- [118] 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>.
- [119] 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>.
- [120] 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>.
- [121] 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>.
- [122] 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>.
- [123] 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>.
- [124] 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>.
- [125] 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).
- [126] 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>.
- [127] 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>.
- [128] 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>.
- [129] 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>.
- [130] 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>.
- [131] 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>.
- [132] 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>.
- [133] 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>.
- [134] A. MIR, R. Zitoune, F. Collombet, B. Bezzazi, Study of Mechanical and Thermomechanical Properties of Jute/Epoxy Composite Laminate, *J. Reinf. Plast. Compos.* 29 (2009) 1669–1680. <https://doi.org/10.1177/0731684409341672>.
- [135] 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>.
- [136] 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>.
- [137] 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.
- [138] A. Shrivastava, 5 - Plastics Processing, in: A.B.T.-I. to P.E. Shrivastava (Ed.), *Plast. Des. Libr.*, William Andrew Publishing, 2018: pp. 143–177. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39500-7.00005-8>.
- [139] K.G. Swift, J.D. Booker, Chapter 5 - Plastics and Composites Processing, in: K.G. Swift, J.D.B.T.-M.P.S.H. Booker (Eds.), Butterworth-Heinemann, Oxford, 2013: pp. 141–174. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099360-7.00005-7>.
- [140] M.I.H. Jamaludin, S. Jamian, M.K. Awang, K.A. Kamarudin, M.K.M. Nor, A.E. Ismail, Characterization of Continuous Gradient Functionally Graded Natural Fiber Reinforced Polymer Composites, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 824 (2020) 12019. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/824/1/012019>.
- [141] R.F. Gibson, A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures, *Compos. Struct.* 92 (2010) 2793–2810. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.05.003>.
- [142] M. Bosquetti, A.L. da Silva, E.C. Azevedo, L.F. Berti, Analysis of the Mechanical Strength of Polymeric Composites Reinforced with Sisal Fibers, *J. Nat. Fibers.* 0 (2019) 1–6. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1612310>.
- [143] M.I. Yusuff, Mechanical Properties of Woven Carbon Fiber/Kenaf Fabric Reinforced Epoxy Matrix Hybrid Composites, *Malaysian J. Microsc.* 15 (2019).
- [144] H.A. Aisyah, M.T. Paridah, S.M. Sapuan, A. Khalina, O.B. Berkalp, S.H. Lee, C.H. Lee, N.M. Nurazzi, N. Ramli, M.S. Wahab, R.A. Ilyas, Thermal Properties of Woven Kenaf/Carbon Fibre-Reinforced Epoxy Hybrid Composite Panels, *Int. J. Polym. Sci.* 2019 (2019) 5258621. <https://doi.org/10.1155/2019/5258621>.
- [145] R.S. Mbakop, G. Lebrun, F. Brouillette, Effect of compaction parameters on preform permeability and mechanical properties of unidirectional flax fiber composites, *Compos. Part B Eng.* 176 (2019) 107083. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107083>.
- [146] Y. Gong, A. Liu, G. Yang, Polyamide single polymer composites prepared via in situ anionic polymerization of ϵ -caprolactam, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 41 (2010) 1006–1011. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.04.006>.
- [147] J.P. Correa-Aguirre, F. Luna-Vera, C. Caicedo, B. Vera-Mondragón, M.A. Hidalgo-Salazar, The Effects of Reprocessing and Fiber Treatments on the Properties of Polypropylene-Sugarcane Bagasse Biocomposites, *Polym.* 12 (2020). <https://doi.org/10.3390/polym12071440>.
- [148] F.G. Torres, B. Ochoa, E. Machicao, Single Screw Extrusion of Natural Fibre Reinforced Thermoplastics (NF RTP): Study of the Material Transport Processes, *Int. Polym. Process.* 18 (2003) 33–40. <https://doi.org/doi:10.3139/217.1727>.
- [149] Y.S. Munde, R.B. Ingle, I. Siva, Effect of sisal fiber loading on mechanical, morphological and thermal properties of extruded polypropylene composites, *Mater. Res. Express.* 6 (2019) 85307. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1dd1>.

- [150] R.S. Teixeira, S.F. Santos, A.L. Christoforo, J. Payá, H. Savastano, F.A.R. Lahr, Impact of content and length of curauá fibers on mechanical behavior of extruded cementitious composites: Analysis of variance, *Cem. Concr. Compos.* 102 (2019) 134–144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.022>.
- [151] D.U. Shah, P.J. Schubel, P. Licence, M.J. Clifford, Hydroxyethylcellulose surface treatment of natural fibres: The new “twist” in yarn preparation and optimization for composites applicability, *J. Mater. Sci.* (2012). <https://doi.org/10.1007/s10853-011-6096-1>.
- [152] S. V. Joshi, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, S. Arora, Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 35 (2004) 371–376. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>.
- [153] M. LEWIN, *Handbook of Fiber Chemistry Third Edition*, 2007.
- [154] P. Wambua, J. Ivens, I. Verpoest, Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics?, *Compos. Sci. Technol.* 63 (2003) 1259–1264. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00096-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00096-4).
- [155] P. Sinthon, Main trends and dynamics of the worldwide composites industry, in: *Soc. Plast. Eng. - 11th-Annual Automot. Compos. Conf. Exhib. ACCE 2011*, 2011.
- [156] A. Bismarck, S. Mishra, T. Lampke, Plant fibers as reinforcement for green composites, in: *Nat. Fibers, Biopolym. Biocomposites*, 2005. <https://doi.org/10.1201/9780203508206.ch2>.
- [157] H. Lilholt, J.M. Lawther, Natural Organic Fibers, in: *Compr. Compos. Mater.*, 2000. <https://doi.org/10.1016/b0-08-042993-9/00048-6>.
- [158] R.M. Rowell, Natural fibres: Types and properties, in: *Prop. Perform. Nat. Compos.*, 2008. <https://doi.org/10.1533/9781845694593.1.3>.
- [159] G. Furtos, L. Silaghi-Dumitrescu, P. Pascuta, C. Sarosi, K. Korniejenko, Mechanical Properties of Wood Fiber Reinforced Geopolymer Composites with Sand Addition, *J. Nat. Fibers.* (2021). <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1621792>.
- [160] 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>.
- [161] J. Arputhabalan, 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>.
- [162] D.F. Liu, Y.J. Tang, W.L. Cong, A review of mechanical drilling for composite laminates, *Compos. Struct.* (2012). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.024>.
- [163] K. Giasin, S. Ayvar-Soberanis, A. Hodzic, An experimental study on drilling of unidirectional GLARE fibre metal laminates, *Compos. Struct.* (2015). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.007>.
- [164] N. Feito, J. Díaz-álvarez, A. Díaz-álvarez, J.L. Cantero, M.H. Miguélez, Experimental Analysis of the Influence of Drill Point Angle and Wear on the Drilling of Woven CFRPs, *Materials (Basel)*. 7 (2014) 4258–4271. <https://doi.org/10.3390/ma7064258>.
- [165] C.L. Tan, A.I. Azmi, Analytical study of critical thrust force for on-set delamination damage of drilling hybrid carbon/glass composite, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2017). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0152-1>.
- [166] S. Velumani, P. Navaneethakrishnan, S. Jayabal, D.S. Robinson Smart, Mathematical modeling and prediction of the thrust force and torque in drilling of sisal/glass-vinyl ester hybrid composite using the RSM, MLPNN, RBFN and ENN methods, *Indian J. Eng. Mater. Sci.* (2013).
- [167] A. Lotfi, H. Li, D.V. Dao, G. Prusty, Natural fiber–reinforced composites: A review on material, manufacturing, and machinability, *J. Thermoplast. Compos. Mater.* (2021). <https://doi.org/10.1177/0892705719844546>.
- [168] T. Rajmohan, R. Vinayagamorthy, K. Mohan, Review on effect machining parameters on performance of natural fibre–reinforced composites (NFRCS), *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 32 (2019) 1282–1302. <https://doi.org/10.1177/0892705718796541>.
- [169] 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>.
- [170] M.M.A. Nassar, R. Arunachalam, K.I. Alzabdeh, Machinability of natural fiber reinforced composites: a review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 88 (2017) 2985–3004. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9010-9>.
- [171] 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>.
- [172] 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>.

- [173] 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>.
- [174] 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>.
- [175] 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>.
- [176] 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>.
- [177] 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>.
- [178] 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>.
- [179] 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>.
- [180] 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>.
- [181] G. Rajaraman, S.K. Agasti, M.P. Jenarathanan, 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>.
- [182] 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>.
- [183] 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>.
- [184] 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>.
- [185] 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>.
- [186] 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>.
- [187] 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>.
- [188] 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>.
- [189] 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>.
- [190] 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>.
- [191] 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>.
- [192] 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>.
- [193] K. Debnath, I. Singh, A. Dvivedi, Drilling Characteristics of Sisal Fiber-Reinforced Epoxy and Polypropylene Composites, *Mater. Manuf. Process.* 29 (2014) 1401–1409. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.941870>.
- [194] 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>.
- [195] 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>.
- [196] 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.
- [197] 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>.
- [198] 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>.
- [199] 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>.
- [200] 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>.
- [201] 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>.
- [202] 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>.
- [203] 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>.
- [204] 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).
- [205] 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>.
- [206] 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>.
- [207] 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>.
- [208] 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>.
- [209] 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>.
- [210] 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).
- [211] 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>.
- [212] 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>.
- [213] 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>.
- [214] 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>.

Chapitre II

CONCEPTS
FONDAMENTAUX EN
STATISTIQUE ET
ANALYSE DE DONNEES :
METHODES D'ANALYSES
RSM ET ANN

Chapitre II.

CONCEPTS FONDAMENTAUX EN STATISTIQUE ET ANALYSE DE DONNEES : METHODES D'ANALYSES RSM ET ANN

Contenu du chapitre	Page
Résumé	55
II.1 Les principes généraux.....	56
II.1.1 La méthode des surfaces de réponse	56
II.1.1.1 Étapes de la méthodologie de surface de réponse	56
II.1.1.2 Les étapes de la RSM	57
II.1.1.2.1 Planification expérimentale.....	57
II.1.1.2.2 Modélisation	59
II.1.1.2.3 Validation des modèles.....	60
II.1.1.2.4 Terminologies à connaître	63
II.1.2 Réseaux de Neurones Artificiels	64
II.1.2.1 Composition d'un neurone	66
II.1.2.2 Architecture d'un réseau	67
II.1.2.3 L'apprentissage.....	70
II.1.2.4 Quelques modèles de réseau de neurone.....	70
II.1.2.4.1 Les réseaux de neurones monocouches.....	70
II.1.2.4.2 Les réseaux multicouches	71
II.1.2.5 Les conditions d'utilisation des réseaux de neurones.....	73
II.1.2.6 Les avantages et limites des réseaux de neurones.....	74
II.2 Conclusion.....	75
II.3 References	76

Chapitre II : Concepts fondamentaux en statistique et analyse de données : Méthodes d'analyses RSM et ANN

Résumé

Afin d'éviter des coûts de calcul prohibitifs lors des calculs de fiabilité, il convient d'aborder le problème de l'usinage par une modélisation simplifiée. Dans ce chapitre, nous allons présenter les deux approches statistiques utilisées dans cette étude, à savoir la méthodologie de la surface de réponse (RSM) et les réseaux de neurones (ANN) pour mettre en évidence la relation entre les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe). Pour ce faire, il a été dans un premier temps indiqué comment le choix du plan d'expérience le plus approprié est effectué afin d'obtenir les expériences les plus intéressantes pour notre type de problème. Ensuite, les modèles développés par la méthodologie de la surface de réponse sont présentés sur la base d'un plan factoriel complet de 27 essais. En outre, dans ce chapitre, le réseau neuronal multicouche (MLP) composé d'une succession de couches, chacune d'entre elles prenant ses entrées à partir des sorties de la couche précédente, adopté pour la réalisation de modèles neuronaux, sera également abordé.

II.1 Les principes généraux

II.1.1 La méthode des surfaces de réponse

La méthode des surfaces de réponse (RSM) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser des procédés. Elle a aussi d'importantes applications dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de la conception de produits existants [1]. L'objectif de cette méthode est, plus que de hiérarchiser les effets des différents facteurs, de décrire le plus précisément possible le comportement de la réponse en fonction des variations des facteurs.

II.1.1.1 Étapes de la méthodologie de surface de réponse

La (Figure II-1) schématise l'enchaînement des étapes de la méthodologie de surface de réponses. Les phases de construction du plan et de modélisation sont étroitement liées et peuvent être menées de manière itérative. Dans une première étape, on construit un plan d'expérience optimal pour le modèle le plus simple possible. Ensuite, ce plan pourrait, éventuellement, être complété si les phases de modélisation et de validation montrent que le modèle présumé s'avère inadéquat.

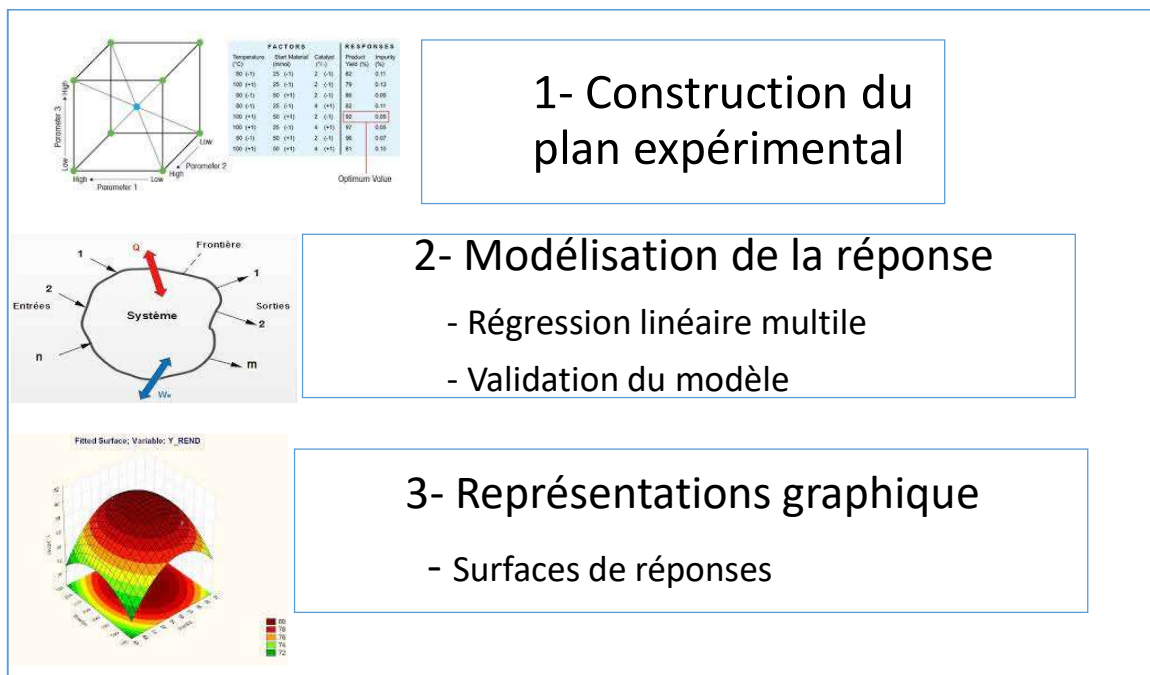


Figure II-1 Etapes de la méthodologie de surface de réponse.

II.1.1.2 Les étapes de la RSM

II.1.1.2.1 Planification expérimentale

Pour une bonne planification expérimentale, il est souhaitable que le nombre d'expériences effectuées, soit le plus faible possible afin de réduire les besoins informatiques, le délai et les coûts d'expérimentation. Une bonne sélection des points pour l'expérimentation permettra de réduire la variance des coefficients de notre modèle mathématique, ce qui rendra les surfaces de réponses obtenues plus fiables. Pour ce faire, il faut déterminer le plan d'expérience le plus approprié afin d'obtenir les expériences les plus intéressantes pour notre type de problème. Les plans utilisés dans le cadre d'une étude de RSM sont des plans quadratiques tels que les plans centraux composites (Box-Wilson) ou les plans de Box-Behnken. Le plan central composite (CCD). Mais d'autres types de plan quadratique s'offrent à l'expérimentateur [1].

Parfois, les modèles linéaires et d'interaction simples ne suffisent pas à fournir une image vivante du processus. Par exemple, supposons que les résultats soient la perte de produit ou le rendement d'extraction, et que l'objectif soit de minimiser la perte et de maximiser le rendement. Si ces entités se trouvent à l'intérieur de la région dans laquelle l'expérience doit être menée, nous avons besoin d'un modèle mathématique capable de représenter la courbure pour qu'il y ait un optimum local. Le modèle le plus simple est le modèle quadratique, comme le montre l'équation (3), qui contient des termes linéaires pour tous les facteurs, des termes au carré pour tous les facteurs et des produits de toutes les paires de facteurs. Les plans de surface de réponse sont généralement utilisés pour ajuster les modèles quadratiques. L'un de ces plans est le plan factoriel complet comportant trois niveaux pour chaque facteur d'entrée. Ce n'est pas vraiment un plan acceptable dans la plupart des cas car il comporte trop d'essais que ceux qui sont nécessaires pour ajuster le modèle. Les plans composites centraux et les plans de Box-Behnken sont les deux plans les plus courants généralement utilisés dans la modélisation de la surface de réponse. Dans ces types de plans, les facteurs prennent trois ou cinq niveaux distincts, mais toutes les combinaisons de ces valeurs n'apparaissent pas dans le plan.

- **Plan composite central (CCD)** : Les plans composites centraux sont un type particulier de plans de surface de réponse qui peuvent s'adapter à un modèle quadratique complet. Le CCD contient un plan factoriel ou factoriel fractionnaire intégré avec des points centraux qui est augmenté d'un groupe de points en étoile

ou axiaux. L'utilisation des points axiaux est un moyen efficace de déterminer les coefficients d'un polynôme du second degré pour les variables polynôme du second degré pour les variables [2]. Un CCD peut être dénoté comme un cube ayant des coins, qui représente le produit des niveaux $[-1, 1]$, une étoile ou des points axiaux le long des axes à l'intérieur ou à l'extérieur du cube. (Aide à calculer la courbure) et un point central à l'origine, comme le montre la Figure II-2.

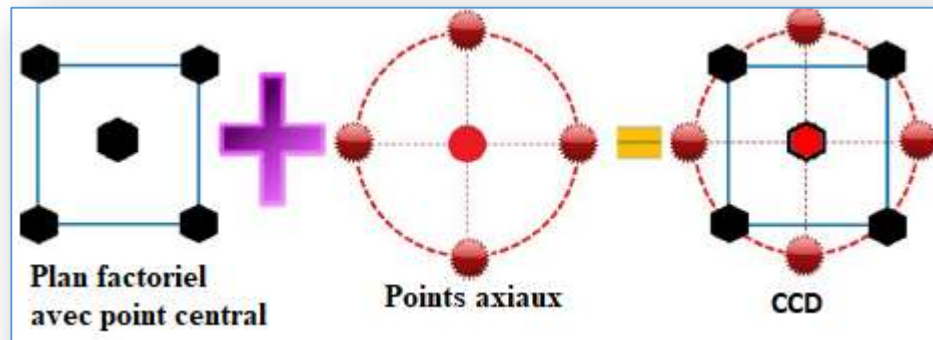


Figure II-2 Une représentation graphique de la conception composite centrale.

- Conception en Box-Behnken (BBD) :** Comme la conception composite centrale, la conception en boîte est capable de s'adapter au modèle quadratique complet du plan de surface de réponse [3]. Le BBD ne contient pas de plans factoriels ou fractionnaires intégrés comme le CCD, ou des plans factoriels fractionnés comme le CCD. Dans ce plan, les combinaisons de traitement se trouvent aux points médians des bords du cube et au centre, comme le montre la Figure II-3. Le BBD est un plan à rotation et nécessite trois niveaux pour chaque facteur. Le BBD doit être envisagé pour les expériences comportant plus de deux facteurs, et lorsqu'il est prévu que l'optimum se situe au milieu des plages de facteurs.

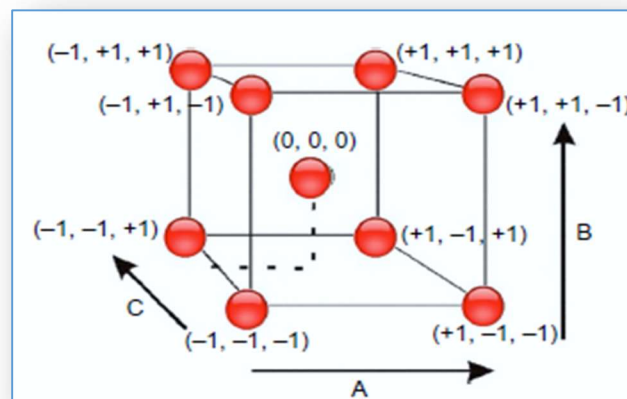


Figure II-3 Une représentation graphique de la conception de Box-Behnken.

II.1.1.2.2 Modélisation

Lorsque l'on utilise la RSM, on cherche à relier une réponse continue y à p facteurs continus et contrôlés X_1, X_2, \dots, X_p à l'aide d'un modèle de régression linéaire qui peut s'écrire :

$$y = f_{\beta}(X_1, X_2, \dots, X_p) + \varepsilon \quad (1)$$

Bien que la forme précise de la fonction de réponse f_{β} soit inconnue, l'expérience montre que l'on peut en avoir une bonne approximation par un polynôme. Dans le cas de deux facteurs, le modèle de régression linéaire est de la forme :

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \quad (2)$$

Il s'agit d'un des modèles les plus simples qui correspond à un modèle du premier degré avec interaction. Lorsque ce modèle est insuffisant pour décrire avec efficacité la réalité expérimentale, il est courant d'utiliser un modèle du second degré incluant les effets quadratiques des facteurs qui, dans la plupart des cas, est suffisant pour modéliser correctement les phénomènes étudiés. Un modèle de surface de réponses du second degré avec d variables peut s'écrire de la manière suivante :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

x_i : variables de prédiction codées appelées facteurs

β : coefficient de régression

ε : erreur totale qui est la différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées de la réponse

Dans la phase d'expérimentation de RSM, il convient de transformer les variables de conception réelles en variables codées, qui sont définies comme étant sans dimension avec une moyenne de zéro et le même écart-type. Le but de l'opération est de traiter tous les facteurs de la même manière et de façon plus aisée car, simplifiée. La règle de passage des variables courantes aux variables codées est :

$$x_i = \frac{2R_i - [R_{max} + R_{min}]}{R_{max} - R_{min}} \quad (4)$$

Où:

x_i : variables de prédiction centrée réduite (codée)

R_i : Variable courante (naturelle, réelle)

Les coefficients de régression, paramètres inconnus du modèle équation (3), sont estimés par la technique des moindres carrés et la qualité d'ajustement du modèle est évaluée à l'aide d'outils classiques de régression linéaire multiple.

Le modèle d'approximation peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\hat{y} = X \cdot b \quad (5)$$

Où: $\hat{y} = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n]^T$ est l'estimation du vecteur de réponse des n réponses observées, X c'est la matrice de terme de modèle évalué aux points de conception et en fin b est l'estimateur des moindres carrés du vecteur de régression β , dont la valeur est estimée en minimisant la somme des carrés de l'erreur SS_E définie par :

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (6)$$

Une fois les modèles mathématiques obtenus, il est nécessaire de vérifier que ces modèles donnent une approximation adéquate du système réel à l'étude.

II.1.1.2.3 Validation des modèles

Une fois la modélisation effectuée, il faut valider les modèles obtenus. Pour cela, des mesures statistiques importantes sont à considérer :

- Le coefficient de détermination statistique : R^2 ;
- Le coefficient de détermination ajusté : R_{adj}^2 ;
- L'erreur rms : RMSE.

Leurs définitions impliquent la partition de l'erreur totale :

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2 \quad (7)$$

En une somme de l'erreur accidentelle et de l'erreur systématique.

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (8)$$

Où : $\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n}$ est la moyenne des réponses.

Quant au coefficient de détermination R^2 il permet d'estimer la variation de la réponse autour de la moyenne qui peut être représentée par le modèle. Il est compris entre 0 et 1 et un R^2 de 1 exprime une correspondance parfaite entre l'évaluation et la valeur réelle ($\hat{y}_i = y_i$). Par contre, un R^2 de 0 signifie que l'évaluation est incapable de prédire la valeur réelle.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (9)$$

En une somme de l'erreur accidentelle et de l'erreur systématique.

Le coefficient de détermination ajusté R_{adj}^2 est une mesure améliorée de R^2 . Contrairement à R^2 , R_{adj}^2 , n'augmente pas lorsque des paramètres redondants sont ajoutés à l'approximation de surface de réponse.

$$R_{adj}^2 = 1 - \left[\frac{n-1}{n-p} \right] (1 - R^2) \quad (10)$$

Quant à la RMSE, il s'agit d'une estimation de la déviation standard de l'erreur aléatoire et peut s'écrire :

$$R_{adj}^2 = 1 - \left[\frac{n-1}{n-p} \right] (1 - R^2) \quad (11)$$

- Graphiques des valeurs résiduelles : Les graphiques des valeurs résiduelles utiles pour vérifier les hypothèses des modèles et peuvent être affichés pour tous les plans et ils sont déterminées par l'évaluation de l'équation (12) [4].

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (12)$$

Où :

y_{ij} : l'observation correspondante des valeurs non ajustées.

\hat{y}_{ij} : l'observation des valeurs ajustées.

- Graphique des valeurs ajustées en fonction des valeurs résiduelles
- Test de normalité d'Anderson Darling : le test d'Anderson Darling est utilisé pour tester si un échantillon de données est issu d'une population ayant une distribution spécifique. Ce test est une alternative au test de chi carré ou de Kolmogorov-Smirnov. Il est basé sur ce dernier mais il est plus puissant. Le test Anderson Darling est défini comme suit :
 - ✓ L'hypothèse nulle H_0 : Les données proviennent d'une population distribuée normalement.
 - ✓ L'hypothèse alternative H_1 : Les données ne proviennent pas d'une population distribuée normalement.

La statistique du test d'Anderson Darling est donnée par [5]:

$$A = -N - S \quad (13)$$

Où : N est la taille de l'échantillon.

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{N} [\log F(Y_i) + \log(1 - F(Y_{N+1-i}))] \quad (14)$$

F : est la fonction de répartition de la distribution spécifiée

Les valeurs critiques dépendent des distributions (normale, log-normale, exponentielle...). Les valeurs de P sont souvent utilisées dans les tests d'hypothèses dans lesquels on peut ou non rejeter une hypothèse nulle. La valeur de P représente la probabilité de faire une erreur de type 1, ou de rejeter l'hypothèse nulle si elle est vraie. Plus la valeur de P est petite, plus la probabilité de faire une erreur en rejetant l'hypothèse nulle est faible. Une valeur limite de 0.05 est utilisée. Autrement dit, rejetez l'hypothèse nulle si la valeur de P est inférieure à 0.05.

Pour prendre une décision, on choisit le niveau de signification, α (alpha), avant le test :

- Si P est inférieur ou égal à α , on rejette H_0 .
- Si P est supérieur à α , on ne rejette pas H_0 .

II.1.1.2.4 Terminologies à connaître

Les neuf terminologies suivantes sont associées à la phase d'optimisation et doivent être clairement comprises.

1. Plan d'expérience : Une technique statistique englobant la planification, l'analyse, la conduite et l'interprétation des données obtenues à partir d'expériences.
2. Réponse : Résultat d'une expérience, qui doit être quantifié ou observé. Exemples : Rendement de l'analyte ciblé, temps de rétention, etc.
3. Facteur/paramètre/prédicteur : Une entité qui contrôle un résultat. Il s'agit d'entrées que l'expérimentateur manipule pour que la sortie change de manière conditionnelle. Ils peuvent être réglés et réinitialisés à différents niveaux en fonction des besoins et des conditions qui affectent l'expérience.
4. Niveau d'un facteur : Il signifie la valeur d'un facteur qui est prescrit dans un plan d'expérience. Les plans sont nommés en fonction du nombre de niveaux choisis pour un facteur, par exemple, plan à deux niveaux, plan à trois niveaux. Exemples : température d'extraction : 20°C (niveau bas, -1), 25°C (niveau moyen, 0), 30°C (niveau élevé, +1) ; temps d'extraction : 1 min (niveau bas, -1), 3 min (niveau moyen, 0), 5 min (niveau élevé, +1), puissance des micro-ondes : 20 W (niveau bas, -1), 40 W (niveau moyen, 0), 60 W (niveau élevé, +1).
5. Randomisation : Lors de la conception et de l'exécution d'une expérience, il existe plusieurs facteurs sous forme de perturbations externes (communément appelés facteurs de bruit), qui peuvent influencer les résultats de l'expérience. Par exemple, les variations de la qualité de la matière première dues aux changements saisonniers, les variations de température, d'humidité et de pression atmosphérique et leurs effets sur le rendement global de l'extraction, les erreurs de l'opérateur et les fluctuations de puissance peuvent influencer le résultat final et ces facteurs sont difficiles à contrôler. La randomisation est l'une des méthodes permettant de supprimer ou de réduire ces erreurs dues à des facteurs incontrôlables. La randomisation permet en fait d'éliminer en moyenne les effets des perturbations externes si elles sont présentes dans le processus.
6. Réplication : La réplication signifie la répétition d'une expérience entière ou d'une partie de celle-ci, dans plus d'une condition d'opération. Elle permet d'obtenir une estimation des erreurs expérimentales et de comprendre et d'estimer plus précisément les facteurs et leur interaction.
7. Blocage : C'est un mode permettant d'éliminer les effets des perturbations externes et, ce faisant, d'améliorer l'efficacité de la conception expérimentale. Les perturbations externes entraînent des variations d'un lot à l'autre, d'un jour à l'autre et d'un jour à l'autre, d'une équipe

à l'autre, etc. L'objectif principal est de regrouper des séries d'expériences similaires en un seul groupe, de sorte que l'ensemble du groupe devienne une unité homogène. Par exemple, un expérimentateur souhaite améliorer le rendement en pourcentage d'un médicament par le biais du MAE. Quatre facteurs sont pris en compte pour les premiers essais expérimentaux, qui pourraient avoir un certain impact sur le rendement d'extraction. Il est décidé d'étudier chaque facteur à deux niveaux (c'est-à-dire une valeur faible et une valeur élevée). Huit essais expérimentaux sont choisis par l'expérimentateur, mais il n'est possible de réaliser que quatre essais par jour. Ici, chaque jour peut être traité comme un bloc distinct.

8. Surface de réponse : La relation entre une réponse et les valeurs d'un ou plusieurs facteurs est la surface de réponse. La surface est généralement un tracé en deux ou trois dimensions de la fonction qui est ajustée aux données expérimentales. La méthodologie de la surface de réponse (RSM) est utilisée pour décrire l'utilisation de plans expérimentaux qui donnent des surfaces de réponse à partir desquelles des informations sur le système expérimental sont déduites [6].
9. Modèle : Une équation qui établit une communication entre les réponses et les facteurs étudiés. Ici, le résultat peut être désigné comme une fonction basée sur les facteurs expérimentaux.

II.1.2 Réseaux de Neurones Artificiels

Dans le domaine de la modélisation non linéaire par apprentissage, une approche sous un angle différent a fait son apparition depuis près de vingt ans : les réseaux de neurones. Les derniers développements apportés à cette méthode, en font un outil puissant permettant pour un échantillon de population réduit d'offrir une simplicité et une rapidité de mise en place intéressantes [7]. Une diminution du nombre d'essais et par conséquent de leurs coûts peut être envisagée par rapport à la démarche « plan d'expérience ». La base de données destinée à alimenter le réseau peut également être enrichi a posteriori par une nouvelle campagne d'essais tout en conservant la même architecture de l'algorithme. Les formidables inventions de la nature sont une source d'inspiration intarissable pour la communauté scientifique.

L'être humain, notamment son cerveau, est une incroyable machine dont les rouages sont petits à petit percés par les avancées scientifiques de ce dernier siècle. Les découvertes dans les neurosciences ont été des sources d'inspiration pour quelques mathématiciens dont les travaux ont permis de développer des algorithmes dits « génétiques » dont l'architecture et l'apprentissage imitent le fonctionnement du cerveau humain et plus particulièrement son réseau de neurones [8]. Cette partie, volontairement incomplète, présentera succinctement la structure et l'organisation du cerveau humain.

Celui-ci est constitué d'environ 100 milliards de neurones. Les neurobiologistes savent que chaque neurone naturel est lui-même connecté à parfois quelques milliers d'autres via 100000 milliards de connexions. Les informations sont transmises en envoyant des ondes de dépolarisation (assimilables à des pics électriques). Le neurone est constitué de trois composantes principales : les dendrites, le corps cellulaire et l'axone (Figure II-4). Les dendrites forment un maillage de récepteurs nerveux qui permettent d'acheminer les signaux électriques vers le corps du neurone. Celui-ci agit à la manière d'un intégrateur, en accumulant des charges électriques. Une fois suffisamment excité, il engendre un potentiel électrique qui se propage à travers son axone, fibre nerveuse, pour éventuellement venir exciter d'autres axones. Le point de contact entre l'axone d'un neurone et la dendrite d'un autre neurone s'appelle la synapse. De façon grossièrement similaire, les neurones artificiels

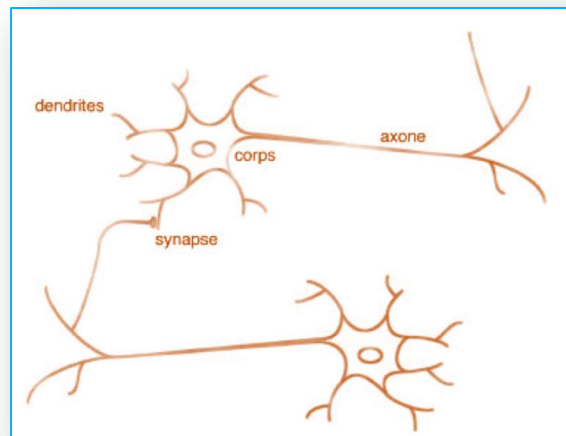


Figure II-4 Schéma d'un neurone biologique [7].

Les réseaux de neurones dont les premières applications remontent aux années 1940 [8], ont fait depuis l'objet d'innombrables développements dans des domaines aussi variés que la reconnaissance de formes, le contrôle non destructif, le filtrage d'informations textuelles, la bio ingénierie, la formulation de matériaux nouveaux, la robotique mais également la finance. Des applications plus en rapport avec le domaine de la productique ont été développées notamment dans l'élaboration de modèles prédictifs ou dans le cadre de la mise en place d'un monitoring de processus. Ces derniers ont été appliqués à la modélisation des efforts en tournage [9], de l'usure d'outil [10]–[12], de la rugosité mais aussi à la modélisation de la formation de la bavure dans l'aluminium [13] et du délaminage pendant le perçage des composites [14]. Dans ces études,

différents types de réseaux et algorithmes d'entraînements sont utilisés. Pour réaliser un choix pertinent quant à l'architecture du réseau, un recensement préalable doit être réalisé en amont, pour établir une comparaison selon divers critères. Ces critères sont : le nombre d'itérations et la performance du réseau.

Pour rentrer dans la phase de sélection, l'architecture d'un réseau de neurones va être détaillée pour mieux comprendre son fonctionnement. La partie qui va suivre a été réalisée à partir des travaux de synthèse de G. Dreyfus [7].

II.1.2.1 Composition d'un neurone

Un réseau de neurones est constitué d'un certain nombre de neurones organisés en couche. Dans un premier temps, l'étude va se focaliser sur la structure d'un neurone, ses entrées et ses sorties.

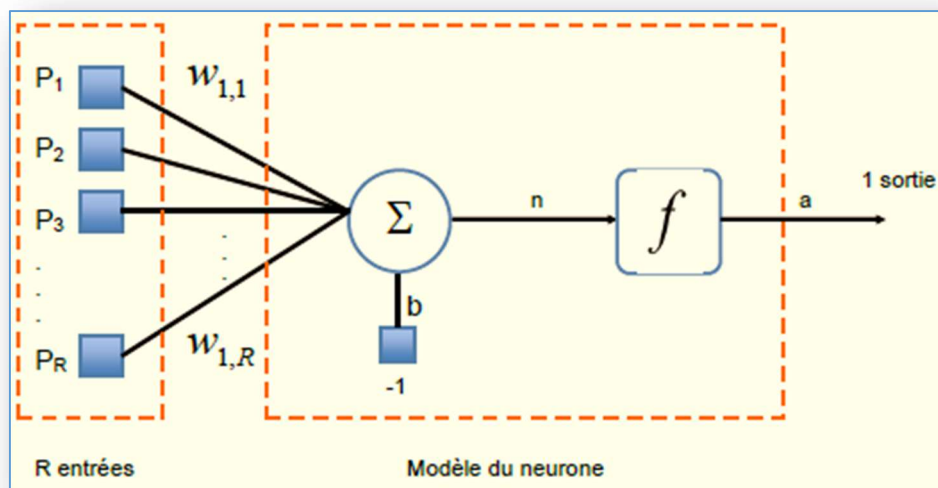


Figure II-5 Modèle d'un neurone artificiel.

Un neurone est essentiellement constitué d'un intégrateur réalisant la somme pondérée de ses entrées ($P_1, P_2, P_3 \dots P_R$) (Figure II-5). La sortie n de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante :

$$n = \sum_{j=1}^R w_{ij} P_j - b \quad (15)$$

que l'on peut aussi écrire sous forme matricielle :

$$n = w^T P - b \quad (16)$$

Cette sortie intermédiaire correspond à une somme pondérée des poids et des entrées moins ce qu'on nomme le biais b du neurone aussi appelé seuil d'activation. Lorsque la somme pondérée est supérieure au seuil, le neurone devient actif, entraînant une propagation vers l'avant. Dans le cas contraire, le neurone est au repos.

Le résultat n de cette somme, appelé niveau d'activation du neurone, est ensuite transformé par une fonction de transfert f produisant la sortie a du neurone. Les R variables d'entrées correspondent au vecteur $P=[P_1P_2P_3\dots P_R]^T$ appelé entrées du neurone. La pondération est réalisée par le vecteur des poids $W=[W_{1,1} W_{1,2} W_{1,3}\dots W_{1,R}]^T$ également désigné sous le nom de poids synaptiques en raison des inspirations biologiques des réseaux de neurone.

La sortie du neurone est quant à elle, une fonction du niveau d'activation du neurone. Elle peut donc s'écrire :

$$a = f(n) = f(w^T P - b) \quad (17)$$

Si l'on remplace w^T par une matrice d'une seule ligne W , on obtient la forme générale suivante :

En conclusion, un neurone réalise simplement une fonction non linéaire, paramétrée, de ses variables d'entrée. L'intérêt des neurones réside dans les propriétés qui résultent de leur association en réseaux, c'est-à-dire de la composition des fonctions non linéaires réalisées par chacun des neurones.

II.1.2.2 Architecture d'un réseau

Un réseau de neurones est un maillage de plusieurs neurones, généralement organisé en couches. Les S neurones d'une même couche sont tous branchés aux R entrées (Figure II-6). On dit alors que la couche est totalement connectée. Un poids w_{ij} , désignant le poids de la connexion qui relie le neurone i à son entrée j , est associé à chacune des connexions. L'ensemble des poids d'une couche forme donc la matrice W de dimension $S \times R$. Chaque couche possède sa propre matrice de poids W_k , où k désigne l'indice de couche.

Dans cette étude, les réseaux de neurones sont utilisés pour réaliser une approximation d'une fonction entre les entrées du problème et les sorties de celui-ci. L'utilisation d'un réseau de neurones multicouches est alors nécessaire (Figure II-7). Un réseau multicouche n'est rien d'autre qu'un assemblage de couches concaténées les unes aux autres, de la gauche vers la droite, en prenant les sorties d'une couche pour les injecter comme entrée dans la suivante. La dernière

couche est nommée -couche de sortie- et les couches la précédant sont nommées -couches cachées-.

Concernant l'architecture du réseau, quelques éléments permettent d'aiguiller la recherche, en particulier les travaux de K. Hornik [15] sur l'approximation par les réseaux de neurones. Toute fonction bornée suffisamment régulière peut être approchée uniformément, avec une précision arbitraire, dans un domaine fini de l'espace de ses variables, par un réseau de neurones comportant une couche de neurones cachés en nombre fini, possédant tous la même fonction d'activation, et un neurone de sortie linéaire.

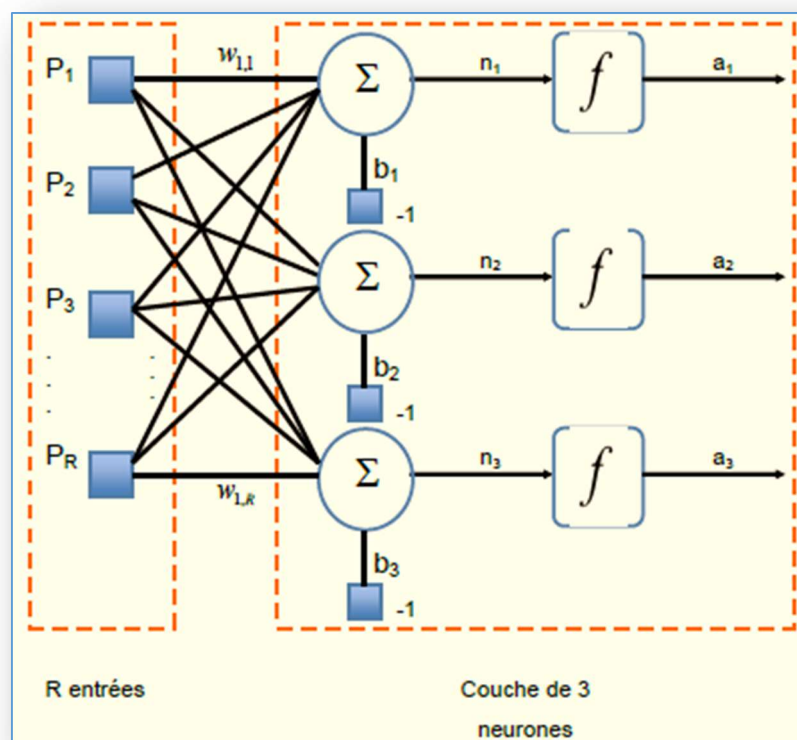


Figure II-6 Couche de S neurones.

Le nombre de neurones sur la couche de sortie est quant à lui déterminé par les spécifications du problème. Celui-ci dépend de la taille du vecteur sortie. Si, par exemple, le vecteur de sortie est de taille 3×1 , la couche de sortie comptera alors 3 neurones

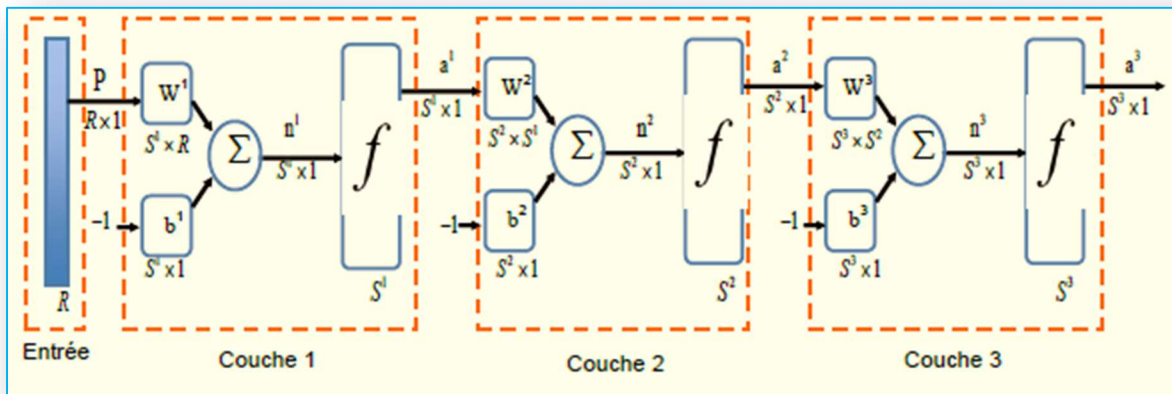


Figure II-7 Réseau de neurones de trois couches.

La mise en place d'un modèle par la méthodologie réseaux de neurones est réalisée en deux étapes (Figure II-8) :

- Une phase d'étalonnage du réseau également appelée apprentissage,
- Une phase d'exploitation, une fois l'étape précédente terminée.

La procédure d'apprentissage va permettre d'estimer les paramètres de ses neurones. Cette procédure est réalisée par l'intermédiaire d'algorithmes d'entraînement dont les performances conditionneront la qualité de la prédiction du modèle.

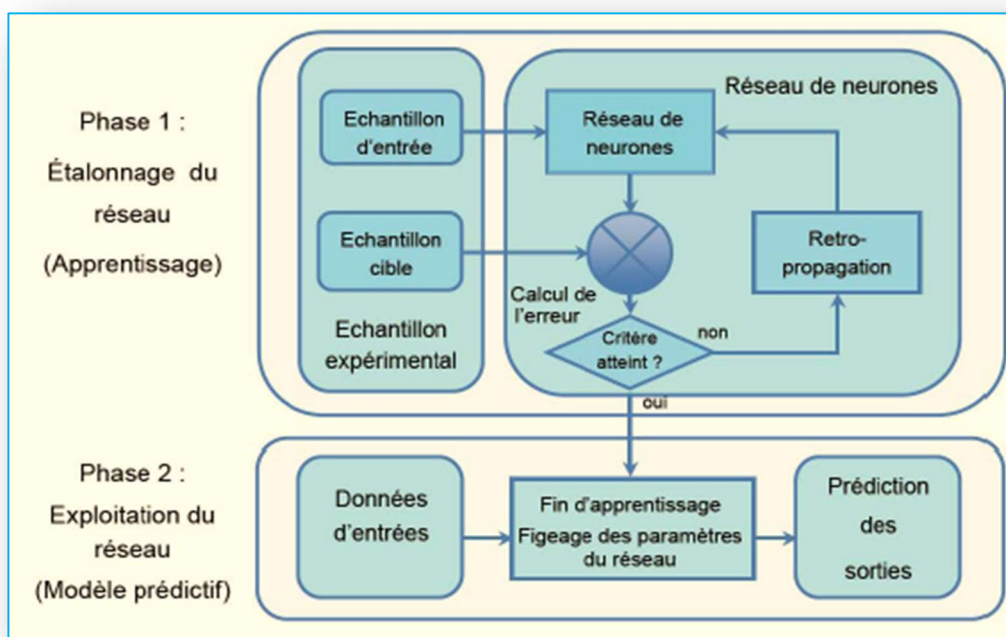


Figure II-8 Mise en place d'un modèle prédictif par les réseaux de neurones.

II.1.2.3 L'apprentissage

Parmi les propriétés usuelles pour un réseau de neurones, la plus fondamentale est sûrement la capacité à apprendre de son environnement, à améliorer sa performance au travers d'un processus d'apprentissage. L'apprentissage est un processus dynamique et itératif permettant de modifier les paramètres d'un réseau pour réaliser la fonction entrée/sortie désirée. Il se traduit par une modification de l'efficacité synaptique, c'est-à-dire par un changement dans la valeur des poids qui relient les neurones d'une couche à l'autre.

Différentes tâches peuvent être réalisées par un réseau de neurones selon le type d'apprentissage et l'architecture du réseau :

- L'approximation,
- L'association,
- Le classement.

II.1.2.4 Quelques modèles de réseau de neurone

II.1.2.4.1 Les réseaux de neurones monocouches

✓ *Le perceptron simple*

Le perceptron (Figure II-9) représente le premier réseau de neurones artificiel, il est très utilisé pour le classement, comme il est introduit dans les réseaux traitant la décision. Il se compose de deux couches de neurones formels appelées « rétine » et « couche de sortie ». La couche rétine est une contraction de la couche d'entrée et de la couche de traitement des informations. Cette contraction a été effectuée pour des raisons de simplification, car la couche d'entrée est une couche inerte qui ne participe pas directement au traitement de l'information. Les cellules de la rétine, lorsqu'elles sont excitées, répondent par « oui » ou par « non » (1 ou 0) à leur sortie, car elles sont régies par une fonction binaire à seuil [15]. La modification des poids du perceptron est effectuée avec un apprentissage de type supervisé en exploitant la loi d'apprentissage de Widrow-Hoff.

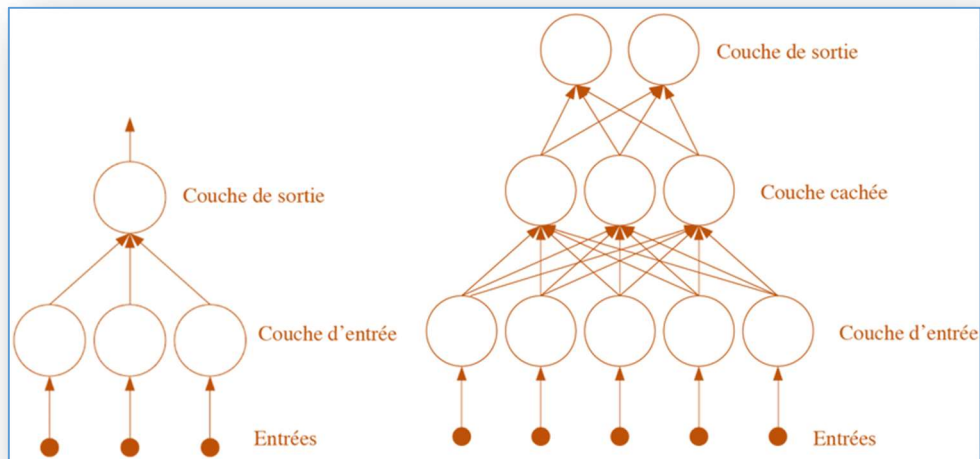


Figure II-9 Perceptron simple.

✓ *Adaline*

Introduit par Widrow et M. Hoff en 1960, le modèle d'Adaline (Adaptive Linear Element) a la même architecture que le perceptron. Une couche d'entrée est connectée à une couche de sortie. La différence entre ce réseau et le perceptron simple est qu'il est destiné à l'approximation des fonctions, et que sa sortie est linéaire [15].

II.1.2.4.2 Les réseaux multicouches

Un réseau de neurones multicouche est composé d'une succession de couches dont chacune prend ses entrées sur les sorties de la précédente. On distingue généralement deux types : le perceptron multicouche (MPL) et les réseaux à fonction de base radiale (RBF).

✓ *Le perceptron multicouche*

La notion de perceptron multicouche (MPL) (Figure II-10) est définie en considérant une couche d'entrée qui correspond aux variables d'entrée, une couche de sortie, et un certain nombre de couches intermédiaires. Ainsi l'élargissement de l'architecture du MPL aux réseaux multicouches règle le problème de la propagation des erreurs dans les couches cachées, ils appartiennent à la famille des algorithmes supervisés.

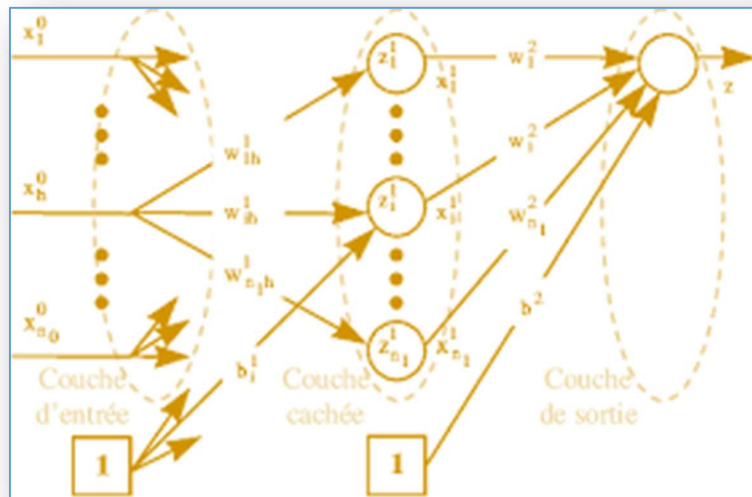


Figure II-10 Perceptron multicouche.

✓ *Les réseaux à fonction de base radiale (RBF)*

Pour des raisons de simplicité, on a décidé de faire une petite dualité entre le réseau RBF et le MPL, en précisant les ressemblances et les différences entre les deux. Ce choix est justifié par la popularité des MPL et leur vaste utilisation dans les applications industrielles. Un réseau de neurones de type RBF est un MPL spécial, son architecture est identique à celle d'un MPL ayant une seule couche cachée donc on peut dire qu'il prend toutes les caractéristiques d'un MPL simple sauf qu'il diffère en quelques points. Nous citons quelques-uns :

a. Le nombre des couches cachées

Un réseau RBF ne peut contenir qu'une seule couche cachée, son architecture est fixée pour tous les problèmes à étudier.

b. La fonction d'activation

Le réseau RBF utilise toujours une fonction dite à base radiale centrée d'un point et munie d'un rayon.

En ce qui concerne les ressemblances entre un réseau RBF et un MPL, on peut mentionner quelques points :

- i. La fonction de sortie : généralement une simple fonction linéaire qui renvoie une sommation pondérée des valeurs calculées par les neurones de la couche cachée. Bien sûr, ce n'est pas toujours le cas, parfois l'utilisation d'autres fonctions pourrait être plus adéquate dans un problème donné.
- ii. Le sens des connexions : les connexions entre les couches suivent le même sens, on peut dire qu'elles ne sont pas récurrentes, et chaque neurone est entièrement connecté vers les neurones de la couche suivante.
- iii. L'apprentissage : pour calculer les poids de la couche de sortie, on utilise un apprentissage supervisé pour les deux types de réseaux.

II.1.2.5 Les conditions d'utilisation des réseaux de neurones

Il est avantageux de mettre en œuvre les réseaux de neurones pour toute application nécessitant de trouver, par des méthodes statistiques, une relation non linéaire entre des données numériques. Le problème posé par l'ingénieur doit satisfaire certaines conditions :

✓ *La taille de l'échantillon*

La première condition, nécessaire et non suffisante est qu'il faut disposer d'un échantillon de taille suffisamment grande, et bien représentatif. (Lors de l'apprentissage)

✓ *Le test sur des modèles simples*

En l'absence de toute connaissance a priori sur l'intérêt d'un modèle non linéaire l'ingénieur doit d'abord utiliser les méthodes simples et éprouver l'élaboration d'un modèle linéaire (qui est simple et moins coûteux en temps de calcul que celui d'un réseau de neurones). S'il s'avère que la précision du modèle est insuffisante bien que tous les facteurs pertinents soient présents dans les entrées du modèle, alors le concepteur de modèle doit envisager la mise en œuvre de modèles non linéaires tels que les réseaux de neurones.

✓ *Utilisation d'autres familles de fonctions non linéaires*

Si les données sont disponibles et s'il on s'est assuré qu'un modèle non linéaire est utile, il faut s'interroger sur l'opportunité d'utiliser un réseau de neurones de préférence à une autre famille de fonction non linéaire, les polynômes par exemple. Il est prouvé que les réseaux de neurones sont plus avantageux quand le nombre de variables est *grand*, c'est-à-dire qu'il est supérieur ou égal à trois.

II.1.2.6 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"> ✓ Les neurones sont des composants non linéaires, ceci est une propriété très importante car cela leur permet de traiter des problèmes physiques non linéaires ; ✓ 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 ; ✓ 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 ; ✓ 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. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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.

II.2 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les 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. Nous avons présenté une étude sur l'algorithme du rétro propagation qui a prouvé son efficacité dans la pratique avec ses capacités d'apprentissage et d'identification. Pour ces raisons, cet algorithme sera la base du travail qui sera présenté dans les prochains chapitres qui traite la commande d'un bras manipulateur par des techniques neuro-floue (ANFIS).

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.

Cependant dans la construction d'un modèle de prédiction de la teneur en nitrates des eaux usées comme prononcé dans l'introduction générale de ce travail nous avons besoin d'un ensemble de données (température, PH, NH₄, DBO₅, DCO etc.), qui sont obtenus au préalable par analyses ou mesures avant et après des procédés de traitement effectués au niveau de la STEP, c'est pourquoi le chapitre suivant sera consacré à l'étude des aspects fondamentaux de la STEP de Guelma, Nous y verrons en détail les différentes techniques existantes pour assainir l'eau avant le rejet sur le milieu naturel .

II.3 References

- [1] R. F. Gunst, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments," *Technometrics*, vol. 38, no. 3, pp. 284–286, 1996, doi: 10.1080/00401706.1996.10484509.
- [2] F. W. Breyfogle III, *Statistical methods for testing, development, and manufacturing*. John Wiley & Sons, 1992.
- [3] M. Manohar, J. Joseph, T. Selvaraj, and D. Sivakumar, "Application of Box Behnken design to optimize the parameters for turning Inconel 718 using coated carbide tools," *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 620–644, 2013.
- [4] Q. K. Beg, R. K. Saxena, and R. Gupta, "Kinetic constants determination for an alkaline protease from *Bacillus mojavensis* using response surface methodology," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 78, no. 3, pp. 289–295, May 2002, doi: <https://doi.org/10.1002/bit.10203>.
- [5] A. K. Sahoo and B. Sahoo, "Mathematical modelling and multi-response optimisation using response surface methodology and grey based Taguchi method: an experimental investigation," *Int. J. Exp. Des. Process Optim.*, vol. 2, no. 3, pp. 221–242, Jan. 2011, doi: 10.1504/IJEDPO.2011.042745.
- [6] L. K. Skartland, S. A. Mjøs, and B. Grung, "Experimental designs for modeling retention patterns and separation efficiency in analysis of fatty acid methyl esters by gas chromatography–mass spectrometry," *J. Chromatogr. A*, vol. 1218, no. 38, pp. 6823–6831, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.07.077>.
- [7] G. Dreyfus *et al.*, *Réseaux de neurones*, vol. 39. Eyrolles Paris, 2002.
- [8] W. S. McCulloch and W. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity," *Bull. Math. Biophys.*, vol. 5, no. 4, pp. 115–133, 1943, doi: 10.1007/BF02478259.
- [9] S. Das, A. B. Chattopadhyay, and A. S. R. Murthy, "Force Parameters for On-line Tool Wear Estimation: A Neural Network Approach," *Neural Networks*, vol. 9, no. 9, pp. 1639–1645, 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(96\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(96)00036-6).
- [10] S. S. Panda, A. K. Singh, D. Chakraborty, and S. K. Pal, "Drill wear monitoring using back propagation neural network," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 172, no. 2, pp. 283–290, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.10.021>.
- [11] K. Patra, S. K. Pal, and K. Bhattacharyya, "Artificial neural network based prediction of drill flank wear from motor current signals," *Appl. Soft Comput.*, vol. 7, no. 3, pp. 929–935, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2006.06.001>.
- [12] S. S. Panda, D. Chakraborty, and S. K. Pal, "Flank wear prediction in drilling using back propagation neural network and radial basis function network," *Appl. Soft Comput.*, vol. 8, no. 2, pp. 858–871, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.07.003>.
- [13] B. Peña, G. Aramendi, A. Rivero, and L. N. L. de Lacalle, "Monitoring of drilling for burr detection using spindle torque," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 14, pp. 1614–1621, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.02.006>.
- [14] S. R. Karnik, V. N. Gaitonde, J. C. Rubio, A. E. Correia, A. M. Abrão, and J. P. Davim, "Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model," *Mater. Des.*, vol. 29, no. 9, pp. 1768–1776, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.03.014>.
- [15] K. Hornik, M. Stinchcombe, and H. White, "Multilayer feedforward networks are universal approximators," *Neural Networks*, vol. 2, no. 5, pp. 359–366, 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8).

Chapitre III

ELABORATION DE
MATERIAUX
BIOSANDWICHES EN
FIBRES DE JUTE/EPOXY A
AME EN AGGLOMERES
DE LIEGE

Chapitre III.

ELABORATION DE MATERIAUX BIOSANDWICHES EN FIBRES DE JUTE/EPOXY A AME EN AGGLOMERES DE LIEGE

Contenu du chapitre	Page
III.1 Introduction.....	77
III.2 Les constituants d'un matériau biosandwiche.....	78
III.3 Présentation des matériaux étudiés	78
III.3.1 Peaux	79
III.3.1.1 Renforts (Fibres de Jute)	79
III.3.1.2 Matrices (résines époxy)	82
III.3.2 Matériau âme (liège).....	83
III.4 Essais spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)	84
III.4.1 Essai de FTIR sur les fibres de jute	84
III.4.2 Essai de FTIR sur la résine époxy.....	85
III.4.3 Essai de FTIR sur le liège.....	87
III.5 Fabrication du biosandwiche	88
III.6 Essais Profilomètre 3D	92
III.7 Conclusion	98
III.8 Références.....	99

Chapitre III :

Elaboration de matériaux biosandwiches en fibres de jute/époxy à âme en agglomérés de liège

III.1 Introduction

Généralement, on distingue deux sortes de matériaux composites structuraux : les stratifiés et les biosandwiches. Les stratifiés sont formés de plusieurs couches élémentaires appelées monocouches. En effet, les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite, et sont formées d'une matière plastique (résine) renforcée d'un matériau fibreux (renfort). La superposition de plusieurs monocouches dans la direction de l'épaisseur permet d'obtenir une structure composite stratifiée. Un choix approprié de la séquence d'empilement ou autrement de l'orientation propre de chaque pli, confère aux structures composites stratifiées certaines caractéristiques mécaniques spécifiques importantes. Par ailleurs, l'idée d'insérer un matériau moins dense entre deux peaux en composites stratifiées, autrement dit la construction biosandwich, a permis d'améliorer davantage la rigidité en flexion des matériaux composites.

Comme pour les stratifiés, les panneaux biosandwiches ont tendance à intégrer des matériaux écologiques. Cette approche écoconception a fait l'objet de plusieurs études scientifiques. Malheureusement peu d'études se sont intéressées à l'utilisation du liège aggloméré comme âme et de fibres naturelles tel que le jute comme renfort naturel dans la conception de panneaux biosandwiches. Nous nous sommes intéressés à ce matériau naturel pour ses qualités d'isolation thermique et acoustique pour pouvoir l'utiliser comme noyau de biosandwich avec peaux jute/époxy. Ce panneau biosandwich est destiné à être utilisé dans les domaines de la construction et du transport. Nous voulons valoriser le naturel dans un contexte industriel, vu que le liège existe en grande quantité et est produit en Algérie, de plus, le prix du liège est très attractif. Plusieurs essais de type mécanique (impact, indentation, choc Charpy, compression perpendiculaire et flexion post-impact) sont effectués pour définir les caractéristiques intrinsèques du biosandwich.

III.2 Les constituants d'un matériau biosandwich

Une structure biosandwich est formée généralement de trois composants possédant des propriétés différentes, mais complémentaires : les peaux, l'âme et l'adhésif.

Les peaux (ou semelles) doivent résister aux moments de flexion. Elles peuvent être de plusieurs natures : en métal, en stratifié, en bois (contreplaqué) ou encore en plaque thermoplastique. Le choix de la nature de la peau s'effectue principalement en fonction des performances mécaniques exigées. Mais généralement, une rigidité élevée et une excellente résistance à la compression et à la tension sont les principales qualités recherchées [1].

L'âme, l'élément central d'une structure biosandwich, est généralement un matériau ayant de faibles caractéristiques mécaniques. Elle a pour rôle de résister aux contraintes de cisaillement engendrées suite au mouvement de glissement des peaux sous charge, et de maintenir leur écartement. En effet, si l'épaisseur des panneaux n'est pas maintenue constante, il en résulte une diminution des capacités des peaux externes à résister à la flexion [2], L'âme est souvent épaisse et de faible masse volumique. L'épaisseur élevée de l'âme a pour but d'accroître le moment d'inertie du panneau sans augmenter la masse volumique. Une structure biosandwich d'épaisseur « $4*t$ » est 37 fois plus rigide que celle d'épaisseur « t », pour seulement une augmentation de 6% de son poids. Les types d'âmes les plus communs dans le secteur industriel sont : le bois de balsa, les nids d'abeilles et les mousses en polymères rigides.

L'élément final, dont l'importance est jugée également cruciale, est le film adhésif. Ce film forme la liaison entre l'âme et les peaux. Cette liaison doit être continue, sans porosité et d'épaisseur constante. Par ailleurs, une capacité suffisante pour s'opposer à la déformation est nécessaire afin de transmettre des sollicitations mécaniques. Mais, aussi elle doit être suffisamment élastique pour absorber et atténuer les impacts [1].

III.3 Présentation des matériaux étudiés

Le matériau étudié dans le cadre de ce travail est un biosandwich composite. La fabrication a été faite au sein de l'atelier à l'université de 20 Aout 1955 Skikda. Les échantillons sont découpés à partir de panneaux et la découpe est faite à l'aide d'une scie diamantée refroidie à l'eau. Dans les paragraphes suivants, nous décrivons les différents constituants du matériau biosandwich.

III.3.1 Peaux

III.3.1.1 Renforts (Fibres de Jute)

La fibre de jute est obtenue à partir de deux plantes herbacées, *Corchorus blanche capsularis* (jute blanc) originaire d'Asie et du *Corchorus olitorius* (jute Tossa) originaires d'Afrique. Après le coton, le jute est la deuxième fibre naturelle la plus couramment cultivée dans le monde et largement cultivé au Bangladesh, Chine, Inde, Indonésie, Brésil ...[3].

La plante de jute pousse six à dix pieds de hauteur et n'a pas de succursales. La tige de la plante est couverte avec une épaisse écorce contenant les fibres de jute. Dans deux ou trois mois, les plantes grandissent et sont ensuite coupées, attachés en paquets et maintenu sous l'eau pendant plusieurs jours pour la fermentation. Ainsi, les tiges pourrissent et les fibres de l'écorce se détachent. Puis les cultivateurs retirent les fibres de l'écorce, les lavent très soigneusement et les laissent sécher sous le soleil.

Le jute est pluricellulaire dans sa structure (Figure III-1). La paroi cellulaire d'une fibre se compose d'un certain nombre de couches : la paroi dite primaire (la première couche déposée au cours du développement cellulaire) et la paroi secondaire (S), qui est à nouveau constitué de trois couches (S1, S2 et S3). Comme dans tous les fibres ligno-cellulosiques, ces couches contiennent principalement de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine en quantités variables. Les fibres individuelles sont collées ensemble par une région riche en lignine, connue comme la lamelle moyenne. La cellulose atteint sa plus forte concentration dans la couche S2 (environ 50 %) et la lignine est plus concentrée dans la lamelle moyenne (environ 90 %) qui, en principe, est pauvre de cellulose. La couche S2 est habituellement de loin la couche la plus épaisse et domine les propriétés des fibres [4].

La cellulose, un composant primaire de la fibre, est un polymère de condensation linéaire composé d'unités D-anhydro-gluco-pyranose réunies par β -1, 4-glycosidiques liaisons [5]. Les longues chaînes de cellulose sont reliées entre elles en plusieurs paquets appelés micro-fibrilles [6].

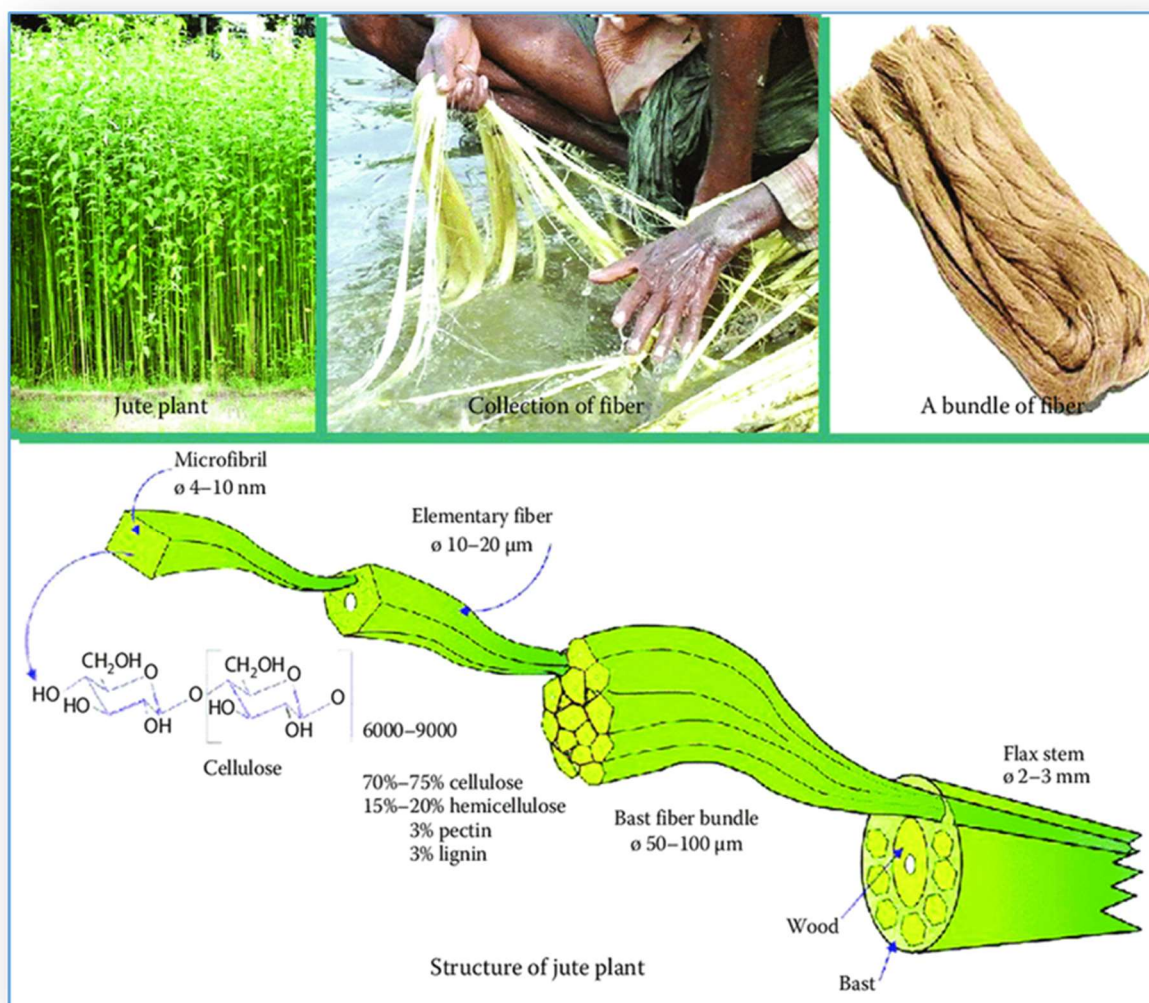


Figure III-1 Structure d'une plante et fibre de jute.

Les hémicelluloses sont également présentes dans toutes les fibres végétales. Les hémicelluloses sont des polysaccharides collés ensemble dans des chaînes de branchement relativement courtes. Ils sont intimement liés à la cellulose microfibrille, intégrant la cellulose dans une matrice. Les hémicelluloses sont très hydrophiles et elles ont de faibles masses moléculaires comparées à celles de la cellulose et la lignine. Le degré de polymérisation (DP) est environ 50 - 200. Les deux principaux types d'hémicelluloses sont xylane et glucomannane.

La lignine est un polyphénol aléatoirement ramifié, composée d'unités de propane phényle (C9). Elle est le plus complexe polymère naturel ayant une haute masse moléculaire [7] avec une structure amorphe. Parmi les trois principaux constituants des fibres, la lignine est considérée être ayant la moindre affinité avec l'eau. Une autre caractéristique importante de la lignine est qu'elle

est un matériau thermoplastique (i.e. à des températures autour de 90 ° C, elle commence à se ramollir et à des températures autour de 170 ° C, elle commence à couler) [4].

La coupe transversale de la fibre de jute est polygonale ou ovale avec une lumière comme indiquée dans la [Figure III-1](#). La structure de la fibre de jute est influencée par les conditions climatiques, l'âge et le processus de fermentation, qui influencent aussi la composition chimique ([Tableau III-1](#)) [8].

La fibre de jute possède modérément de hautes résistance et rigidité spécifiques. Par conséquent, elle convient comme renfort dans une matrice de résine polymère. Toutefois, elle présente des variations considérables de diamètre avec la longueur des filaments individuels. Les propriétés de la fibre dépendront de facteurs tels que les méthodes de taille, la maturité et le traitement adopté pour l'extraction de la fibre. Les propriétés telles que la densité, la résistivité électrique, la résistance à la traction et le module initial sont liées à la structure interne et la composition chimique de la fibre [9], [10].

[Tableau III-1](#) Composition chimique du jute

Substance	Taux massique (%)
Cellulose	65
Hémi-cellulose	22,5
Lignine	11
Graisse et cire	0,3
Matériaux solubles dans l'eau	1,2

Propriétés physiques de la fibre de jute

Fibres de Jute possède des propriétés physiques standard. Ceux-ci sont :

- Longueur de jute ultime : 1,5 à 4 mm.
- Diamètre final du jute : 0,015 à 0,002 mm.

- Longueur de la fibre de jute : 150 à 300 cm.
- Couleur de jute: Jute fibre peut être blanc, jaune, marron ou gris.
- Résistance du jute : 3,5 à 5 G / Den.
- Gravité spécifique : 1,48
- Récupération d'humidité du jute : 13,75% (standard).
- Élasticité : Extension de rupture 1,8% et récupération élastique très faible.
- Résilience : mauvaise.
- Stabilité dimensionnelle du jute : bonne en moyenne.

III.3.1.2 Matrices (résines époxy)

Le choix d'une résine polymère structurale ne pose pas de problème d'approvisionnement mais constitue un frein à la recyclabilité de l'ensemble. Cependant, les résines labellisées écologiques ou naturelles ne répondent pas au cahier des charges du produit final en raison des faibles propriétés mécaniques qui les caractérisent. Les résines naturelles sont biodégradées : 4 à 5 ans (enterrés sous terre), 20 à 40 jours (dans un tas de compost), en comparaison il faut 4 siècles pour dégrader un objet en polyéthylène [11]. Malgré cet avantage écologique très important, les résines naturelles présentent de mauvaises caractéristiques mécaniques, elles sont rigides et cassantes comme la polylactone (PLA) avec le jute [12], [13]. Le polysaccharose naturel TPS (résine bio) se dissout dans l'eau [14], [15]. De plus, la migration de l'eau dans la résine peut mener à une perturbation de l'interface fibre/matrice [16], [15]. Les résines époxydes présentent de bonnes propriétés mécaniques et une bonne adhésion sur les fibres et matériaux divers en particulier sur le jute seulement, certaines de ces résines se polymérisent à des températures suffisamment élevées ce qui affectent les caractéristiques du renfort. Nous devons choisir une résine qui se polymérise à une température relativement basse pour ne pas détruire le tissu de jute utilisé, similairement que Mir et col. [17].

Le durcisseur est un agent permettant la réticulation du polymère. Il ouvre le cycle époxy et réagit avec le prépolymère pour en relier les chaînes en un réseau tridimensionnel.

Les avantages des résines époxy sont leur faible retrait de polymérisation, une excellente résistance mécanique, de bonnes propriétés électriques et de résistance chimique. La molécule époxy contient également deux groupes anneaux à son centre qui sont capables d'absorber à la fois des contraintes mécaniques et thermiques mieux que les groupes linéaires et donc donner à la résine époxy une très bonne rigidité, ténacité et résistance à la chaleur. Les principaux

inconvenients des résines époxy sont un durcissement lent associé à une pauvre caractéristique de démoulage.

Les résines époxy sont caractérisées par des résistances adhésives élevées. Cette propriété est attribuée à la polarité des groupes d'hydroxyles aliphatiques et des groupes éther qui existent dans la résine précurée et post-cuite. La polarité associée à ces groupes favorise des forces de collage électromagnétiques entre les molécules d'époxy et les renforts.

III.3.2 Matériau âme (liège)

Le liège est la couche subéreuse (parenchyme de suberose, ou écorce) des espèces *Quercus Suber* L., connue généralement sous le nom de liège de chêne. Il se compose d'agrégats de celluloses, en 42 millions/cm³, qui ont cinq couches murales. Le liège est des plus souples matériaux naturels connus. C'est un matériau léger, élastique, flexible et imperméable aux gazes et liquides, impérissable et bon isolateur électrique et thermique, isolateur phonétique [18] et diélectrique. Ces propriétés uniques résultent de sa structure cellulaire fermée [19].

L'union européenne, et particulièrement les pays méditerranéens du sud, est la productrice principale du liège dans le monde. Le Portugal, qui possède environs 60% de la surface totale des arbres de liège, produit 80% de la production mondiale de liège. Les forêts de liège se sont extrêmement bien adaptés aux régions semi-arides du sud de l'Europe, empêchant la désertification et abritant plusieurs espèces animales et végétales.

La faible conductivité thermique du liège combinée à une résistance raisonnable à la compression font de ce matériau un excellent isolateur thermique lorsque des charges compressives sont présentes. Sa propriété de frottement (anti-glissement) le rend également bon pour des revêtements de sol ou dans les poignées. Aujourd'hui, les produits du liège sont utilisés pour l'isolation thermique des réfrigérateurs et des fusées, pour l'isolation acoustique des sous-marins et les studios d'enregistrement, tel des joints dans les instruments en bois et les chambres de combustion, et en tant qu'absorbeur d'énergie dans les planchers, les chaussures et l'emballage, et naturellement comme taquets [18].

La production de taquets en liège (liège naturel) est capable de consommer seulement 25% de la matière première, d'où la recherche de nouvelles applications. Les composites en liège sont une partie des récentes dérivées du liège et ils sont un des plus prometteurs domaines de l'évolution de la technologie liège.

III.4 Essais spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

Les essais FTIR (Figure III-2) ont été effectués au Laboratoire d'Élaboration des Matériaux et Fabrication, École Nationale Polytechnique de l'université de Constantine (ENPC), Algérie.

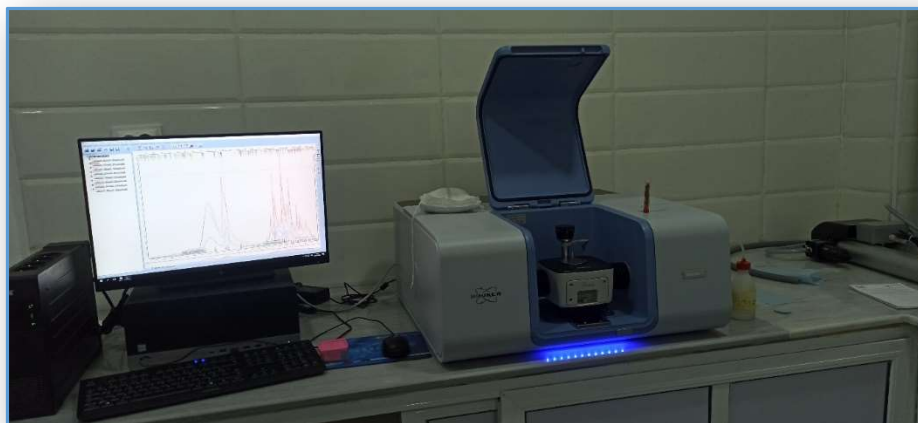


Figure III-2 Vue générale de la machine FTIR model INVENIO-R (329).

FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) est une technique d'analyse spectroscopique utilisée pour étudier les interactions entre les molécules et la lumière infrarouge. Elle est largement utilisée dans divers domaines, tels que la chimie, la biologie, la pharmacologie, la science des matériaux et bien d'autres.

Le spectre FTIR obtenu représente l'intensité de la lumière infrarouge absorbée en fonction du nombre d'onde (inverse de la longueur d'onde). Chaque groupe fonctionnel présent dans l'échantillon a des fréquences de vibration caractéristiques qui se manifestent sous forme de pics dans le spectre. Ces pics fournissent des informations sur la composition chimique de l'échantillon, notamment les liaisons C-H, C=O, C-O, N-H, O-H, etc.

III.4.1 Essai de FTIR sur les fibres de jute



Figure III-3 Échantillons Y (fibres de jute).

Tableau III-2 Recherche de pics (fibres de jute)

Nombre d'onde	Intensité abs.	Intensité rel.	Largeur	Seuil	Epaulement
4325,732	0,021	0,017	33,170	1,09	0
4251,038	0,014	0,009	34,637	0,61	0
3335,262	0,024	0,011	258,663	0,66	0
2912,552	1,436	1,436	34,922	100,02	0
2846,043	1,043	0,866	26,839	60,19	0
1735,125	0,044	0,041	35,571	2,85	0
1465,192	0,187	0,186	29,076	12,87	0
1166,676	0,025	0,011	37,606	0,64	0
722,711	0,096	0,096	28,062	6,61	0

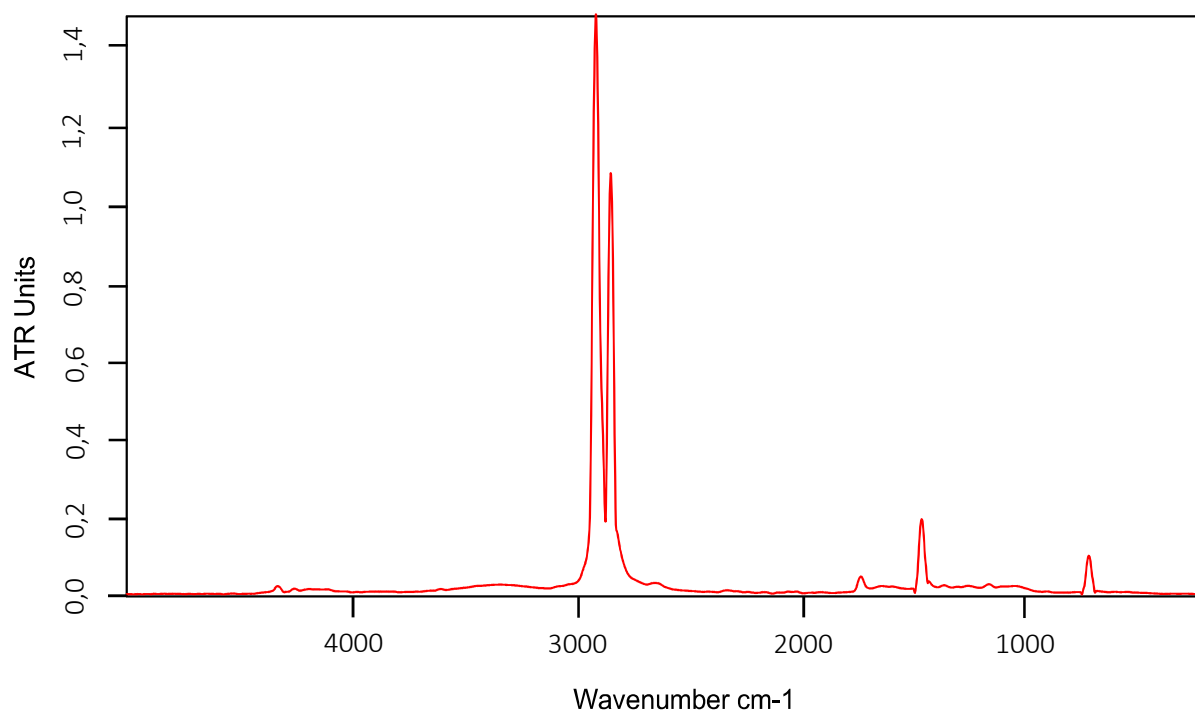


Figure III-4 Spectre FTIR de la fibre de jute.

III.4.2 Essai de FTIR sur la résine époxy

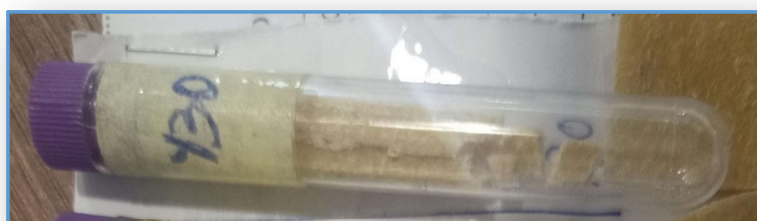


Figure III-5 Échantillons Y30 (résine époxy).

Tableau III-3 Recherche de pics (résine époxy)

Nombre d'onde	Intensité abs,	Intensité rel,	Largeur	Seuil	Epaulemen t
4832,637	0,002	0,002	49,705	0,77	0
4610,226	0,002	0,002	26,903	0,53	0
4530,805	0,002	0,002	31,754	0,57	0
3852,004	0,008	0,004	141,659	1,40	0
3742,897	0,010	0,004	26,999	1,36	0
3336,689	0,256	0,256	314,203	99,99	0
2901,256	0,097	0,056	107,548	19,90	0
2321,852	0,017	0,005	172,461	0,92	0
2110,296	0,012	0,007	84,299	2,06	0
1951,076	0,009	0,007	75,982	1,34	0
1732,397	0,064	0,056	44,707	19,58	0
1636,254	0,049	0,028	86,610	9,32	0
1505,033	0,022	0,005	20,494	1,29	0
1425,292	0,057	0,021	56,635	6,06	0
1368,450	0,065	0,011	20,282	3,56	0
1322,593	0,066	0,028	82,652	10,15	0
1241,121	0,078	0,051	54,995	19,30	0
1157,382	0,072	0,020	23,258	3,28	0
1032,058	0,218	0,218	148,300	85,20	0
899,965	0,039	0,009	23,590	2,14	0
658,945	0,053	0,008	26,474	1,21	0
554,784	0,066	0,060	268,380	21,51	0
349,571	0,033	0,015	36,016	3,69	0
232,173	0,003	0,003	22,325	1,15	0

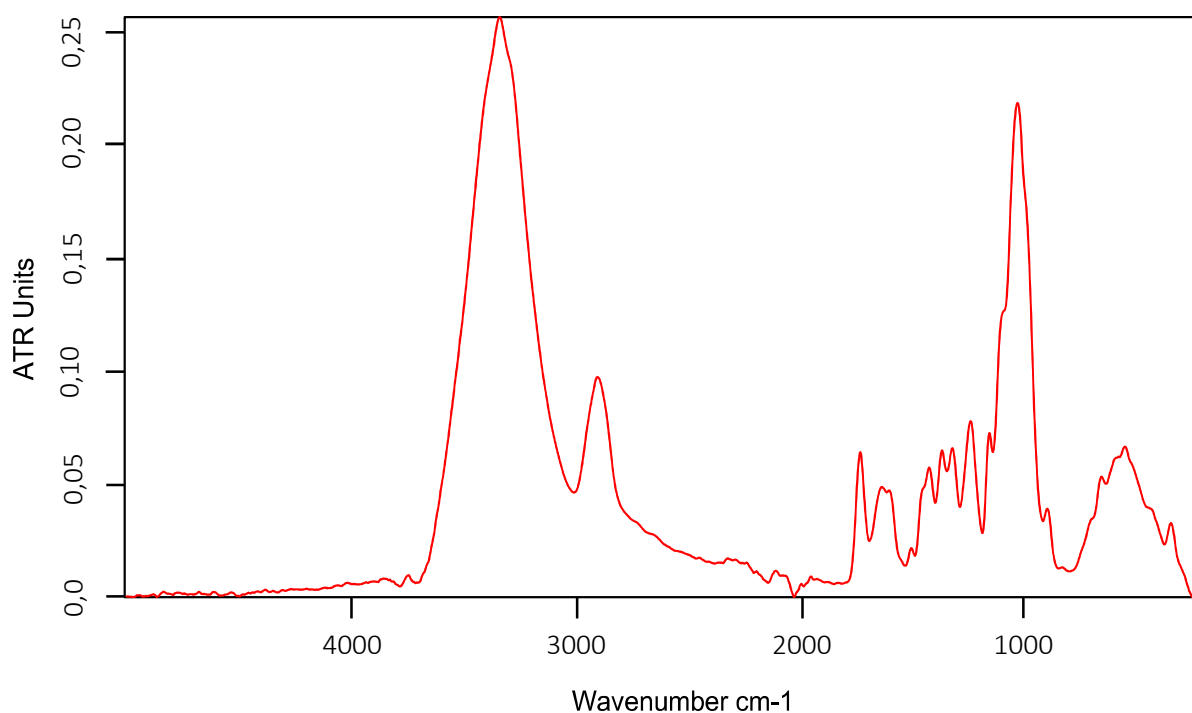


Figure III-6 Spectre FTIR de la résine époxy.

III.4.3 Essai de FTIR sur le liège

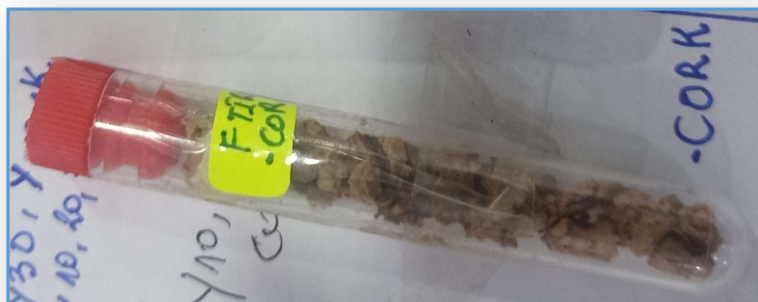


Figure III-7 Échantillons COR (liège).

Tableau III-4 Recherche de pics (liège)

Nombre d'onde	Intensité abs.	Intensité rel.	Largeur	Seuil	Epaulemen t
4865,847	0,003	0,002	56,310	0,86	0
4776,002	0,003	0,002	39,028	1,09	0
4676,791	0,003	0,002	50,056	0,89	0
4606,496	0,003	0,002	59,300	0,85	0
4536,117	0,004	0,002	35,180	1,03	0
4344,067	0,005	0,002	35,813	0,62	0
4194,073	0,006	0,002	118,144	0,64	0
3852,470	0,008	0,005	100,507	2,44	0
3743,491	0,008	0,004	24,403	1,76	0
3684,032	0,012	0,001	12,966	0,70	0
3294,397	0,134	0,082	308,795	37,49	0
2922,055	0,194	0,194	125,289	100,01	0
2854,405	0,138	0,036	23,158	17,29	0
2325,221	0,020	0,005	129,206	1,26	0
2104,624	0,010	0,007	73,601	2,90	0
1992,913	0,006	0,004	25,789	1,38	0
1925,054	0,006	0,006	74,356	2,68	0
1726,272	0,120	0,036	35,317	13,00	0
1641,511	0,135	0,093	150,320	39,37	0
1547,468	0,087	0,013	60,963	3,68	0
1453,041	0,103	0,040	70,070	14,54	0
1378,584	0,089	0,006	27,994	1,30	0
1245,754	0,108	0,020	55,246	7,35	0
1155,728	0,121	0,013	28,769	4,77	0
1032,693	0,165	0,151	310,779	73,34	0
534,822	0,056	0,030	206,148	13,03	0
468,264	0,053	0,013	36,088	4,19	0

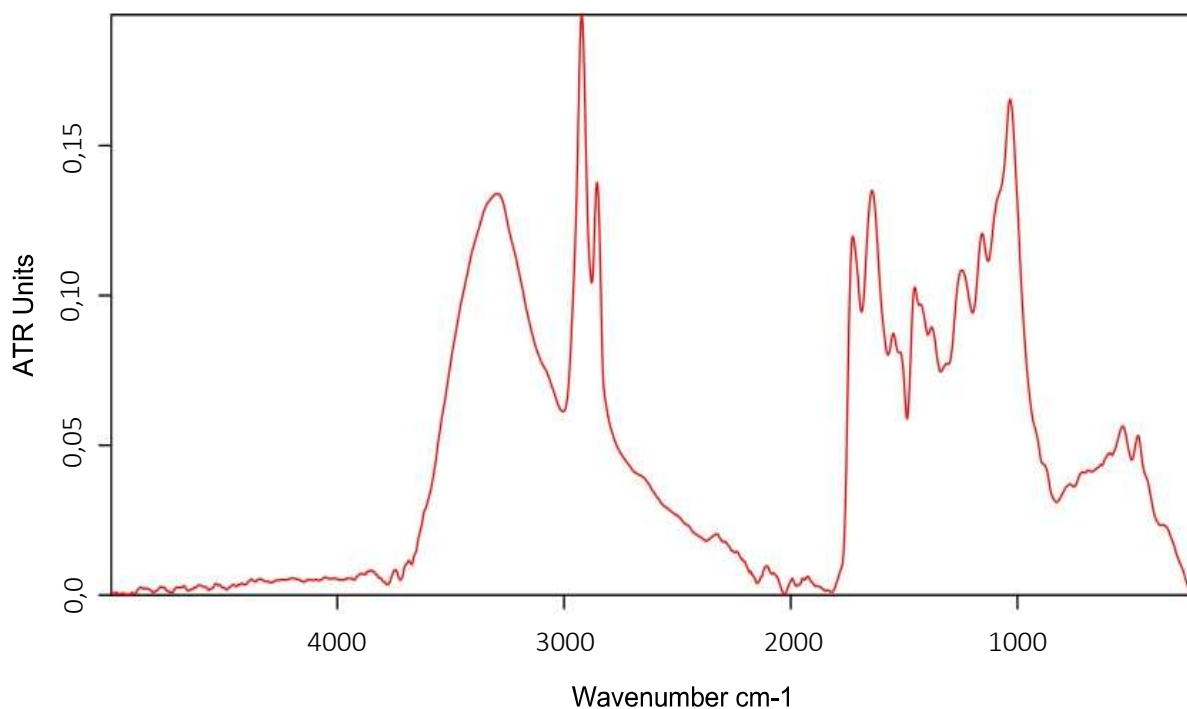


Figure III-8 Spectre FTIR du liège.

En résumé, le FTIR est une technique puissante et polyvalente pour l'analyse des matériaux, permettant de caractériser leur composition chimique, d'identifier des composés inconnus, de suivre des réactions chimiques et d'étudier les interactions moléculaires.

III.5 Fabrication du biosandwich

Dans cette étude, le renfort est composé d'une fibre de jute bidirectionnelle (Figure III-9) ayant une masse surfacique de 160 g/m^2 (28 x 23 fils/100 mm).



Figure III-9 Renfort « toile de jute ».

Et d'une résine époxy classée MEDAPOXY STR, fournie par la société GRANITEX (Algérie) (Figure III-10), dont la densité est de $1,110 \text{ kg/m}^3$. Les propriétés mécaniques moyennes de la

résine époxy utilisée dans cet article ont été décrites par Belaadi et al. et Cherief et al.[20], [21] dans des travaux antérieurs (résistance à la traction de 43,13 MPa, allongement de 4,03% et module de Young de 2,47 GPa).



Figure III-10 Matrice « résine époxy, durcisseur et accélérateur ».

En outre, des matériaux ont été utilisés comme noyaux d'agglomérés dans la fabrication d'échantillons de biosandwiches comme le liège (Figure III-11), avec une épaisseur de 15 mm et une densité nominale de 280 kg/m³.



Figure III-11 Ame « plaque de liège ».

Le tissu de jute, le liège aggloméré et la résine époxy ont été obtenus auprès de sources locales. Après la préparation du moule (Figure III-12), des échantillons de biosandwiches (jute/liège/époxy) a été effectuée par un processus de moulage par contact à la main, puis découpée aux dimensions de 300 mm×300 mm. La structure biosandwich obtenue était une feuille rectangulaire de 300 mm de long, 300 mm de large et d'environ $20\pm 0,8$ mm d'épaisseur et était composée de cinq couches. En outre, le biosandwich avait une teneur en fibres de 30% en poids. L'assemblage EBJWC a été durci et maintenu dans le moule à la pression atmosphérique standard (1 bar) jusqu'à la fin du durcissement, pendant 24 heures à une température ambiante de 25°C. Les plaques ont été conservées à l'air libre pendant 15 à 20 jours pour assurer la polymérisation complète de la résine. Enfin, elles ont été post-polymérisées à 50°C pendant 8 heures dans un four. Après fabrication, les échantillons destinés aux expériences de perçage ont été découpés aux dimensions suivantes : $290\times 100\times 20$ mm³. Une scie diamantée a été utilisée pour découper les échantillons, qui ont été lubrifiés avec de l'eau pour éviter l'échauffement causé par le processus de découpe. Les échantillons ont ensuite été séchés à l'air à température ambiante (25°C) pendant 20 jours (Figure III-13).

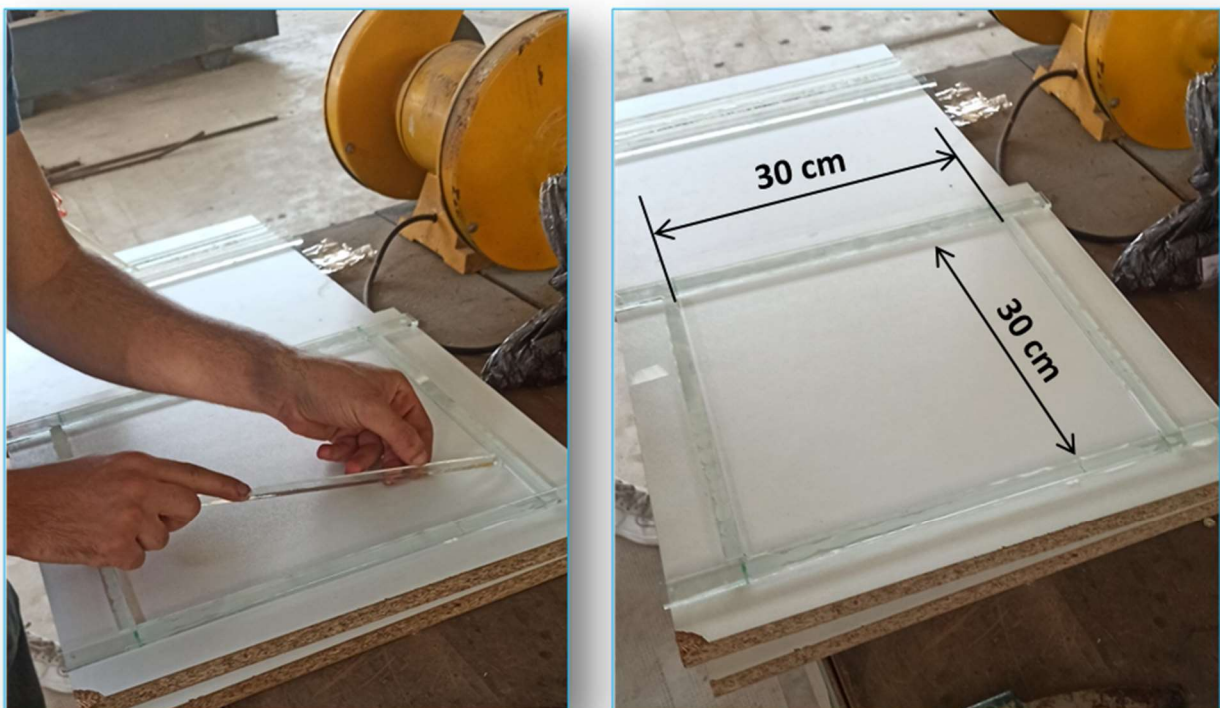


Figure III-12Moule.

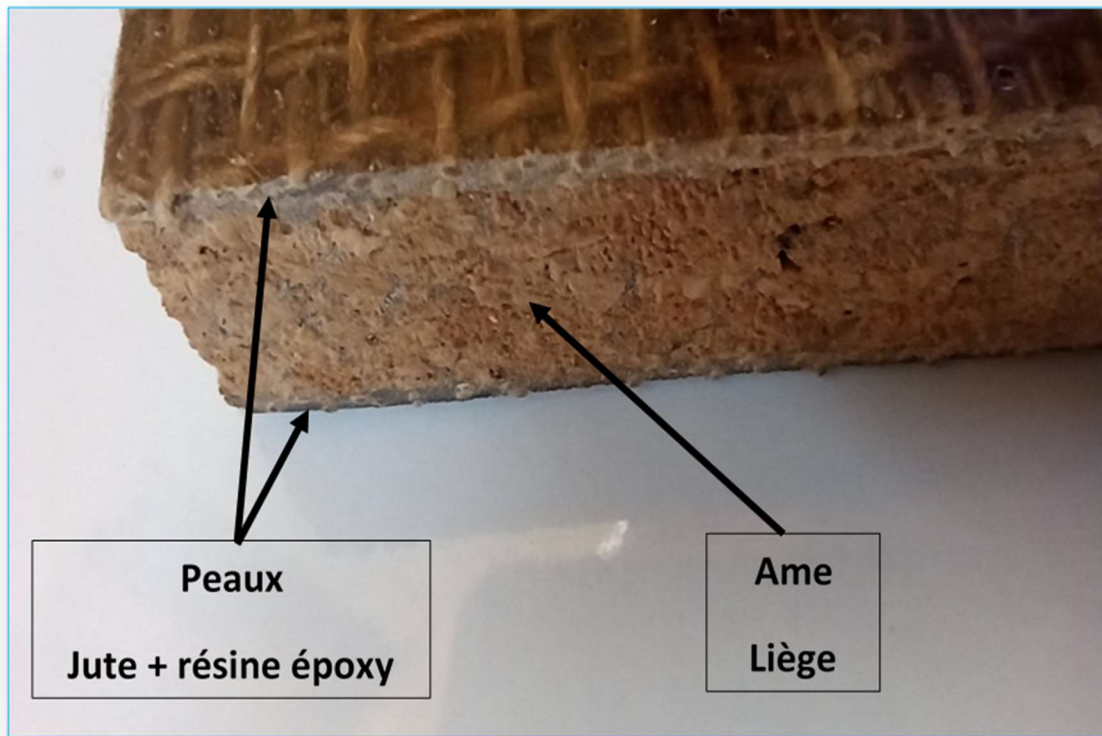


Figure III-13 Produit finale « biosandwich jute/époxy/liège ».

III.6 Essais Profilomètre 3D

Avant les essais du profilomètre, nous avons effectué le processus de perçage sur la plaque biosandwich, et nous l'avons bien expliqué ce processus dans le chapitre suivant (**Chapitre 4**).

Les essais Profilomètre 3D (**Figure III-14**) ont été effectués au Laboratoire d'Élaboration des Matériaux et Fabrication, École Nationale Polytechnique de l'université de Constantine (**ENPC**), Algérie.

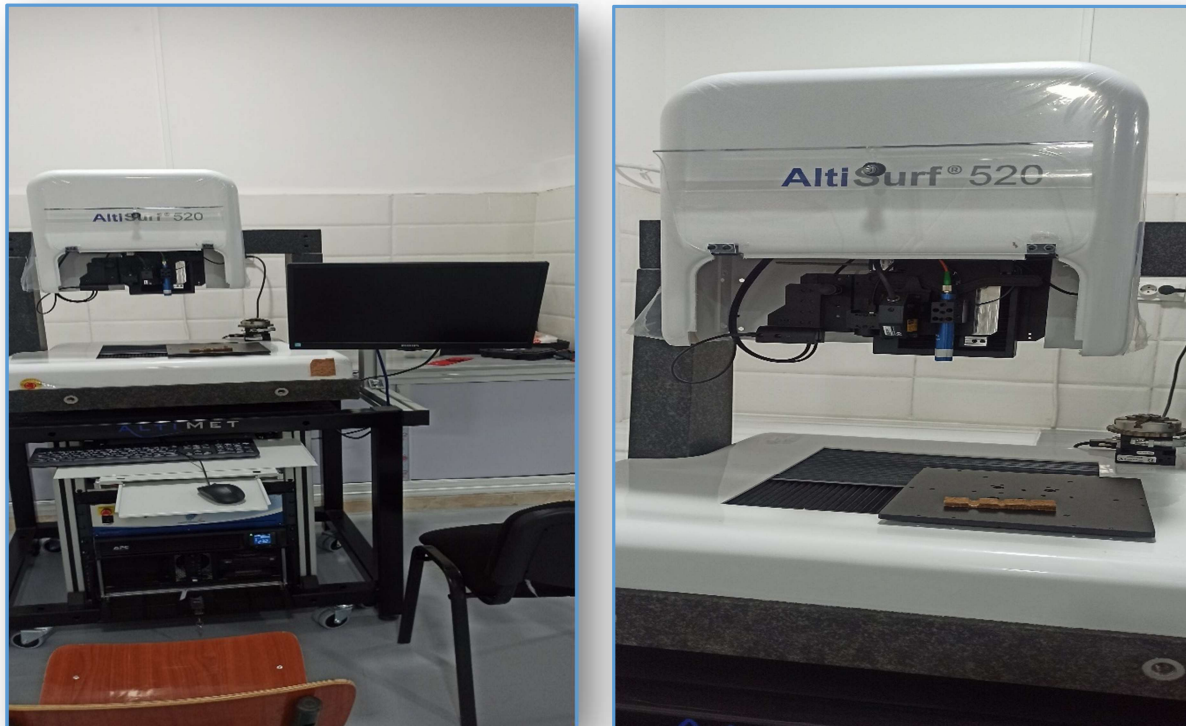


Figure III-14 Vue générale de la machine PROFILOMETRE 3D model Altisurf 520.



Figure III-15 Échantillons du 3 trous (Biosandwiches jute/époxy/liège).

Un profilomètre 3D est un instrument de mesure utilisé pour capturer et analyser la topographie d'une surface en trois dimensions (Figure III-17). Il permet de mesurer avec précision les caractéristiques géométriques d'un objet, telles que la rugosité, la planéité, la hauteur, la profondeur des rainures, etc.

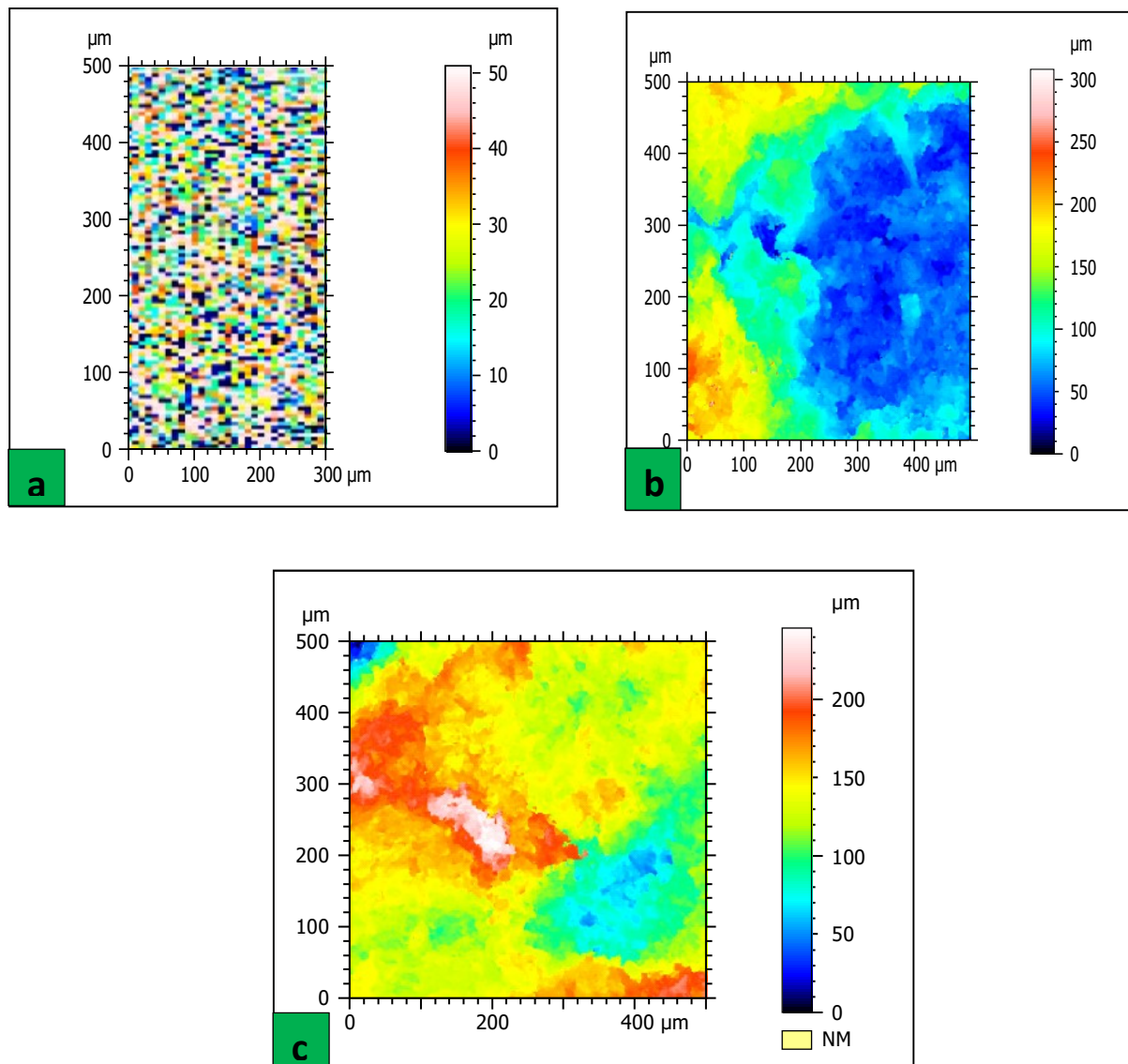


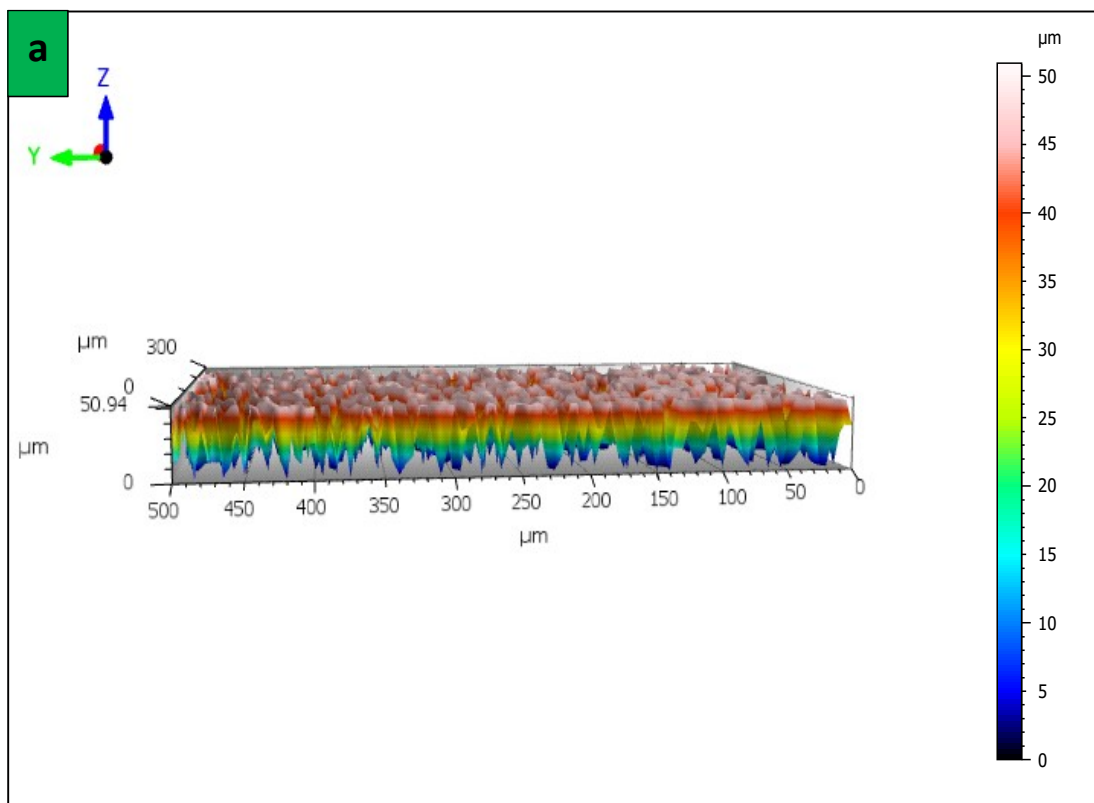
Figure III-16 Le profil des surfaces en 2D de les échantillons : (a) trou n°1, (b) trou n°2 et (c) trou n°3

Tableau III-5 Les paramètres de rugosité de surface "S" de l'échantillon : (a) trou n°1, (b) trou n°2 et (c) trou n°3

ISO 25178				a
Paramètres de hauteur				
Sq	17,54	μm	Hauteur quadratique moyenne	
Ssk	-0,3608		Facteur d'asymétrie	
Sku	1,628		Kurtosis	
Sp	21,28	μm	Hauteur maximale des pics	
Sv	29,66	μm	Profondeur maximale de creux	
Sz	50,94	μm	Hauteur maximale	
Sa	15,65	μm	Hauteur arithmétique moyenne	

ISO 25178				b
Paramètres de hauteur				
Sq	48,88	μm	Hauteur quadratique moyenne	
Ssk	0,6857		Facteur d'asymétrie	
Sku	2,396		Kurtosis	
Sp	211,8	μm	Hauteur maximale des pics	
Sv	96,19	μm	Profondeur maximale de creux	
Sz	308,0	μm	Hauteur maximale	
Sa	41,67	μm	Hauteur arithmétique moyenne	

ISO 25178				c
Paramètres de hauteur				
Sq	33,91	μm	Hauteur quadratique moyenne	
Ssk	0,0453		Facteur d'asymétrie	
Sku	3,317		Kurtosis	
Sp	107,5	μm	Hauteur maximale des pics	
Sv	138,1	μm	Profondeur maximale de creux	
Sz	245,6	μm	Hauteur maximale	
Sa	26,25	μm	Hauteur arithmétique moyenne	



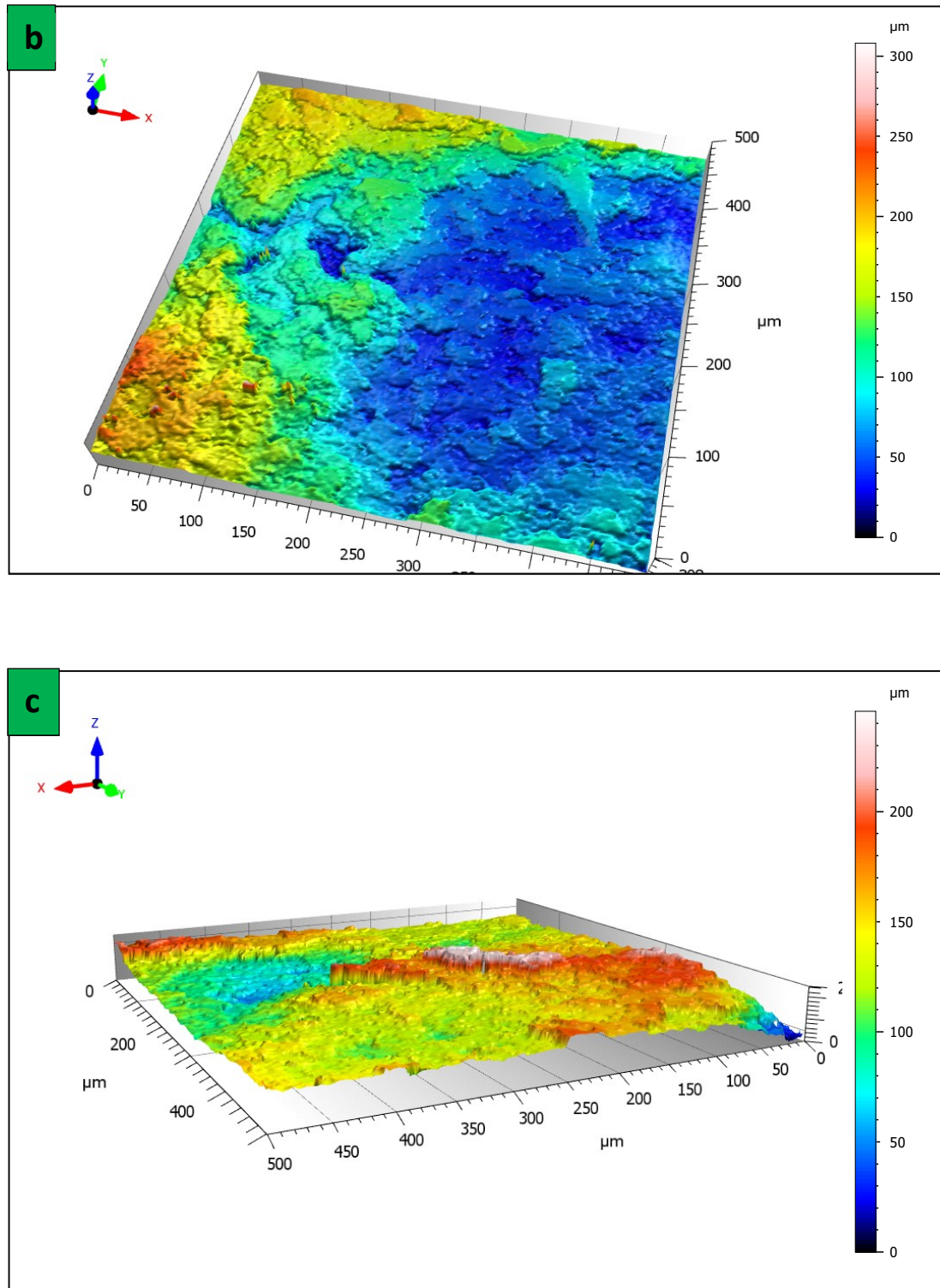


Figure III-17 Vu 3D de la rugosité de surface de l'échantillon : (a) trou n°1, (b) trou n°2 et (c) trou n°3

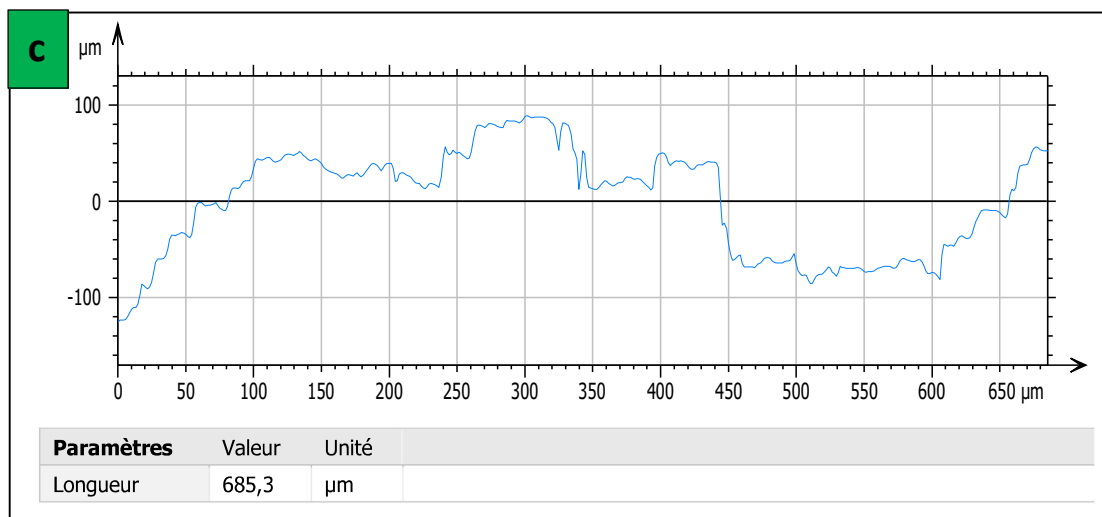
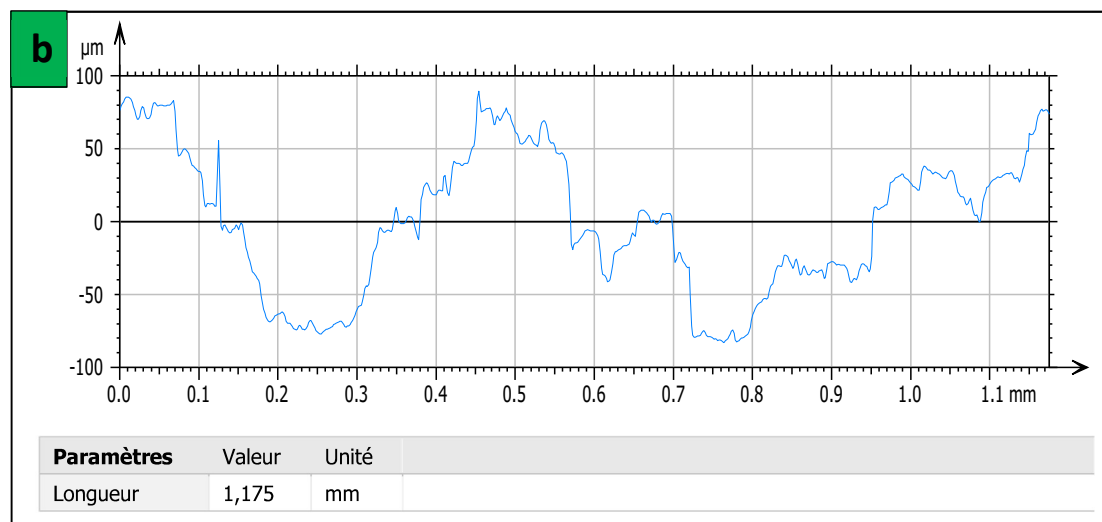
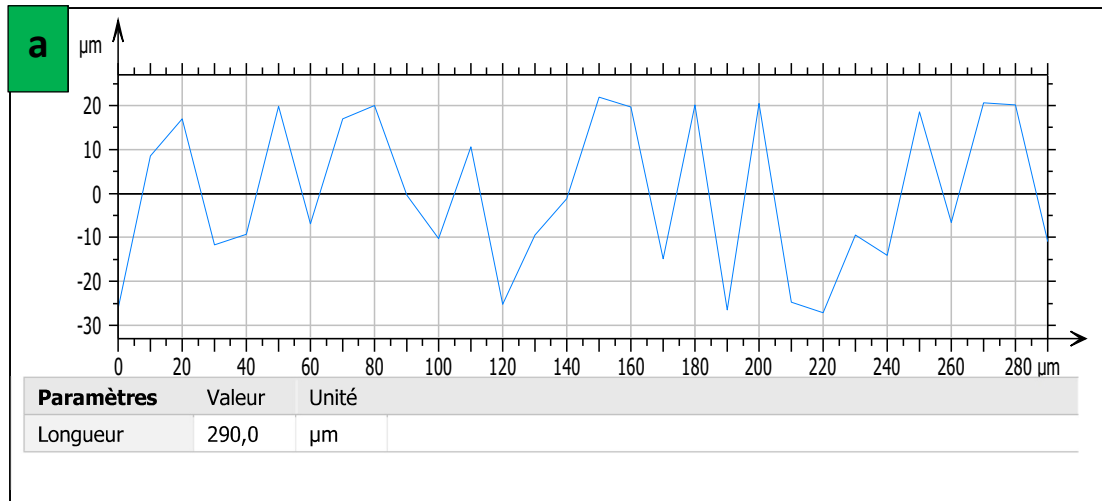


Figure III-18 profile mesure represente par une courbe de hauteur z en fonction de la position x de l'échantillon : (a) trou n°1, (b) trou n°2 et (c) trou n°3

Tableau III-6 Les paramètres de profil de rugosité "R" de l'échantillon : (a) trou n°1, (b) trou n°2 et (c) trou n°3

ISO 4287				a
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité				
Rp	17,59	µm	Filtre gaussien, 0,08 mm	
Rv	18,76	µm	Filtre gaussien, 0,08 mm	
Rz	36,35	µm	Filtre gaussien, 0,08 mm	
Rc	31,30	µm	Filtre gaussien, 0,08 mm, Sans moyennage (valeur unique)	
Rt	51,07	µm	Filtre gaussien, 0,08 mm	
Ra	12,88	µm	Filtre gaussien, 0,08 mm	
Rq	13,93	µm	Filtre gaussien, 0,08 mm	
Rsk	-0,03563		Filtre gaussien, 0,08 mm	
Rku	1,393		Filtre gaussien, 0,08 mm	
Paramètres liés au taux de longueur portante - Profil de rugosité				
Rmr	4,545	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0,08 mm	
Rdc	28,67	µm	$p = 20\%$, $q = 80\%$, Filtre gaussien, 0,08 mm	

ISO 4287				b
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité				
Rp	41,09	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rv	31,33	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rz	72,41	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rc	43,96	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm, Sans moyennage (valeur unique)	
Rt	83,99	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm	
Ra	14,11	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rq	16,55	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rsk	-0,08828		Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rku	2,193		Filtre gaussien, 0,25 mm	
Paramètres liés au taux de longueur portante - Profil de rugosité				
Rmr	0,1706	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rdc	30,19	µm	$p = 20\%$, $q = 80\%$, Filtre gaussien, 0,25 mm	

ISO 4287				c
Paramètres d'amplitude - Profil de rugosité				
Rp	30,01	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rv	36,50	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rz	66,50	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rc	40,39	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm, Sans moyennage (valeur unique)	
Rt	91,43	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm	
Ra	15,86	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rq	18,76	µm	Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rsk	0,1808		Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rku	1,822		Filtre gaussien, 0,25 mm	
Paramètres liés au taux de longueur portante - Profil de rugosité				
Rmr	0,3367	%	$c = 1 \mu\text{m}$ sous le pic le plus haut, Filtre gaussien, 0,25 mm	
Rdc	41,42	µm	$p = 20\%$, $q = 80\%$, Filtre gaussien, 0,25 mm	

En conclusion, un profilomètre 3D est un outil précieux pour mesurer les caractéristiques de surface d'un matériau ou d'une structure. Il permet d'obtenir des données détaillées sur la forme, la taille, la rugosité et d'autres paramètres importants.

III.7 Conclusion

La fabrication d'une plaque biosandwich jute/époxy/liège présente de nombreux avantages et opportunités. Ce type de plaque combine les caractéristiques spécifiques de chaque matériau pour créer un produit final à la fois léger, résistant et écologique.

La combinaison du jute, de l'époxy et du liège offre une résistance élevée aux impacts, à l'abrasion et à la compression. Le jute, en tant que couche extérieure, protège le cœur de la plaque, tandis que l'époxy agit comme une matrice résistante et adhésive. Le liège, quant à lui, ajoute de la légèreté, de l'isolation thermique et acoustique, ainsi qu'une capacité d'absorption des chocs.

La fabrication d'une telle plaque nécessite une expertise dans le travail des matériaux composites et des procédés de stratification. Il est essentiel de garantir une bonne adhérence entre les différentes couches et de contrôler les paramètres de fabrication tels que la pression, la température et le temps de durcissement de l'époxy.

III.8 Références

- [1] Noor A.K., Burton W.S. & Bert C.W., " Computational Models for Sandwich Panels and Shells ", Appl. Mech. Rev., Vol. 49, N° 3, pp 155-199, 1996.
- [2] Feichtinger K. A., " Test methods and performance of structural core materials-1. Static properties ", 4 ASM Int. Engineering Society of Detroit Advanced Composites Conf. and Exposition, Sept., 1988.
- [3] Price B. & al., " Fibre, vegetable ", Comprehensive polymer science Vol. 7, pp 22, Ed. by C. Pergamon, Oxford, 1989.
- [4] Olesen P.O., " Perspectives on the performance of natural plant fibres ", The Royal Veterinary and Agricultural University Taastrup Conference, Copenhagen- Denmark, 27-28 May 1999.
- [5] Eichhorn S. J., Baillie C. A., Zafeiropoulos N., Mwaikambo L. Y., Ansell M. P., Dufresne A., Entwistle K. M., Herrera-Franco P. J., Escamilla G. C., Groom L., Hughes M., Hill C., Rials T. G. & Wild P. M., " Review current international research into cellulosic fibres and composites ", Journal of Material Science and technology 36, pp 2107-2131, 2001.
- [6] Farabee M. J., " The Online Biology Book ", Estrella Mountain Community College, in sunny Avondale, Arizona.
- [7] Hon D. N. S. & Shiraishi N., " Wood and cellulosic chemistry ", 2nd Ed. Marcel Dekker, New York, 2001.
- [8] Bledzki A. K. & Gassan J., " Composites reinforced with cellulose based fibres ", Progress in Polymer Science, 24, pp 221-274, 1999.
- [9] Mohanty A.K., Misra M. & Drzal L.T., " Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: An overview ", Composite Interfaces, Vol. 8, N° 5, pp 313-343, 2001.
- [10] Wang B., " Pre-treatment of flax fibers for use in rotationally molded bio-composites ", Master thesis, Department of agricultural and bio-resource engineering, university of Saskatchewan, Canada, 2004.
- [11] Source : " Bioplastique, le vivant prend la relève " par Coisne. S., Sciences et Vie, N°1039, pp 44 - 47, Avril 2004.
- [12] Alvarez V., Rodriguez E. & Vázquez A. " Thermal degradation and decomposition of Jute/Vinylester composites ", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 85 N°2, pp 383–389, 2006.
- [13] Gassan J., Mildner I. and Bledzki A. K., " Influence of fiber structure modification on the mechanical properties of flax fiber-epoxy composites ", Mechanics of Composite Materials, Vol. 35, N° 5, pp 435-440, 1999.
- [14] Chaudhuri K., Chaudhuri M.A., " Effects of short-term NaCl stress on water relations and gas exchange of two jute species ", Biologia plantarum 40 N° 3, pp 373-380, 1998.
- [15] Wollerdorfer M. & Bader H., " Influence of natural fibres on the mechanical properties of biodegradable polymers ", Industrial Crops and Products, Vol. 8, N° 2, pp 105–112, 1998.
- [16] Hearle J.W.S., " The fine structure of fibers and crystalline polymers. III-Interpretation of the mechanical properties of fibers ", J. of Applied Polymers Sci., Vol. 7, N° 4, pp 1207-1223, 1963.
- [17] Hachemane B., Benlokrihi B., Mir A. & Bezzazi B., « Influence de la séquence d'empilement de différents stratifiés sur leur comportement mécanique », ACMA2007, May 22-24 2007, Agadir-Morocco, 2007. <http://www.esta.ac.ma/acma2007>
- [18] Gil L. & Moiteiro C., « Cork », In Ullmann's Encyclopedia of Chemical Technology, 6th ed.; Wiley-VCH: Verlag, Germany, 2003.
- [19] Gil L., " Cork Composites: A Review ", Materials 2, pp 776-789, 2009.
- [20] M. Cherief, A. Belaadi, M. Bouakba, M. Bourchak, and I. Meddour, "Behaviour of lignocellulosic fibre-reinforced cellular core under low-velocity impact loading: Taguchi method," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05393-9.

- [21] A. Belaadi, M. Boumaaza, S. Amroune, and M. Bouchak, "Mechanical characterization and optimization of delamination factor in drilling bidirectional jute fibre-reinforced polymer biocomposites," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06217-6.

Chapitre IV

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

Chapitre IV.

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

Contenu du chapitre	Page
Résumé.....	101
IV.1 Introduction	102
IV.2 Méthodes et techniques expérimentale.....	104
IV.2.1 Procédure expérimentale de perçage	104
IV.3 Résultats et discussion	107
IV.3.1 Influence des paramètres de perçage sur le facteur de délaminage	107
IV.3.2 Méthodologie de surface de réponse et ANOVA pour le facteur de délamination	108
IV.3.3 Tracés de surface 3D pour le facteur de délamination.....	113
IV.3.4 Optimisation des réponses	120
IV.4 Conclusion.....	125
IV.5 Références	126

Chapitre IV :
Comportement en perçage d'une structure biosandwich en
fibre de jute/époxy : optimisation par RSM

Résumé

Dans ce chapitre, nous allons développer les modèles mathématiques du délaminage des structures en biosandwiches constituées d'une matrice époxy renforcée de fibres bidirectionnelles en jute et en liège (JFCE) par la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) en appliquant le plan d'expériences à 27 essais et une analyse de variance ANOVA afin d'évaluer l'influence des paramètres de perçage sur le délaminage. Ces modèles permettent de mettre en évidence la relation entre les variables influençant le perçage (vitesse de coupe, vitesse d'avance et le diamètre des forets) et les réponses étudiées (délaminage F_d) pour les deux types de forets utilisés HSS-TiN et BSD.

IV.1 Introduction

Au cours des vingt dernières années, les fibres végétales se sont révélées être une alternative écologique intéressante aux fibres de verre dans les composites à matrice organique en raison du potentiel de croissance des fibres végétales dans le secteur industriel [1]–[3]. L'utilisation des fibres naturelles comme renfort des composites à matrice polymère a suscité, ces dernières années, l'intérêt des chercheurs et des industriels d'un point de vue économique et écologique [4], [5]. Cette utilisation se justifie, d'une part, par l'utilisation de ressources locales, la mise au point de matériaux et la prise en compte de l'impact environnemental des technologies et la réduction des coûts de production tout en maintenant de bonnes performances par rapport à celles des fibres synthétiques (verre et carbone). D'autre part, cela est dû au potentiel des fibres naturelles en termes de propriétés mécaniques qui peuvent concurrencer pour certains types de fibres végétales, les fibres synthétiques couramment utilisées dans l'industrie [6]–[8]. Les fibres naturelles sont initialement biodégradables et sont souvent considérées comme neutres par rapport aux émissions de CO₂ dans l'atmosphère, car leur biodégradation ne produit qu'une quantité de dioxyde de carbone. Les biocomposites sont donc plus faciles à recycler. Ils sont principalement utilisés dans de nombreux domaines, tels que la construction, le sport et le transport. En effet, afin de mieux comprendre le comportement de ces biocomposites, des études scientifiques approfondies ont été menées par plusieurs chercheurs [9], [10]. Actuellement, il existe une grande variété de fibres végétales qui sont utilisées comme renforts pour différentes matrices [11], telles que le sisal [12], jute [12], [13], l'Agave americana L. [14], le lin [15], [16], le Washingtonia filifera [17], la vigne Luffa [18] et le bambou [19].

Cependant, l'usinage est également une opération importante lors de la préparation des surfaces composites pour l'assemblage par collage pour les applications multi-matériaux [20]. L'usinabilité des composites dépend principalement de la structure et des caractéristiques intrinsèques des fibres et des propriétés mécaniques entre les fibres et la résine responsables de la création de divers défauts lors de l'usinage, notamment la délamination, la fissuration, les fibres non coupées et la déchirure des fibres, qui conduisent à des surfaces rugueuses [21]–[23]. Dans le cas des biocomposites avec un renforcement en biofibres, le comportement mécanique des fibres doit être pris en compte car ce comportement est beaucoup plus important que celui de la matrice et en raison de l'influence que ce comportement aura sur l'état final de la pièce usinée. Plusieurs travaux de recherche ont abordé l'usinage lors du perçage de composites avec des fibres synthétiques de verre, d'aramide et de carbone pour étudier les mécanismes

d'interaction entre les outils de coupe et le matériau et identifier les paramètres d'usinage les plus influents par rapport au comportement des fibres et ainsi choisir le procédé le plus adapté [24]–[31]. Cependant, la littérature ne contient qu'un nombre limité de travaux traitant de l'usinage des biocomposites [32]–[55] et d'études comparatives entre biocomposites et composites avec fibres de verre [56]. Le phénomène le plus étudié par les chercheurs est le délaminage lors du perçage. En effet, plusieurs théories et techniques existent dans la littérature pour déterminer le facteur de délamination [21], [31], [57], [58]. En effet, les outils les plus couramment utilisés sont les forets hélicoïdaux standards en acier rapide (HSS) [39], [46], [47], [50], [54], [55], [59] ou en carbure de tungstène (WC) [47]. L'angle de la pointe du foret est généralement choisi pour être de 118° avec des diamètres d'outils allant de 3 à 14 mm. Il existe également d'autres types d'outils testés pour le perçage des biocomposites, tel qu'un foret à brad en carbure de tungstène [56] et un foret HSS à deux arêtes de coupe [55].

Aravindh et Umanath [60] ont utilisé la méthode de Taguchi dans le cas du perçage de biocomposites NFC (fibres de jute, de sisal et de bambou) afin de déterminer les conditions optimales de perçage pour minimiser la délamination. Les auteurs ont estimé les contributions de différents éléments dans des conditions de perçage optimales, notamment le diamètre du foret (88,19%), la vitesse d'avance (7,64%) et la vitesse de coupe (2,62%). Des essais de perçage réalisés par Mercy et al. [61] sur des biocomposites époxy renforcés avec des fibres d'ananas à différentes orientations ont été effectués sous différentes conditions d'usinage en utilisant un tableau orthogonal L27 de Taguchi. Les résultats ont montré qu'une vitesse d'avance plus faible, une vitesse plus élevée et un diamètre de perçage plus petit minimisent la force de poussée. Nagamadhu et al. [62] ont mené une étude sur la délamination pendant le perçage à différents diamètres de foret d'un sandwich composite renforcé d'ester vinylique avec des fibres de sisal unidirectionnelles en utilisant différents paramètres de coupe. Les auteurs ont utilisé la méthode Taguchi L9 pour optimiser les paramètres d'entrée afin de minimiser la délamination. Les chercheurs ont conclu que les paramètres optimaux du diamètre du foret, de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance donnés par ANOVA étaient respectivement de 6 mm, 3000 rpm et 50 mm/min. Machado et al. [63] ont proposé une nouvelle méthode d'évaluation de F_d (facteur de délamination). Cette technique est basée sur l'acquisition d'images par radiographie numérique de la zone endommagée pendant le perçage. Dans un travail récent, Belaadi et al. [21] ont mené une étude intéressante sur l'effet des paramètres de perçage tels que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et les diamètres de perçage sur des biocomposites fibre de jute/polyester courts pour évaluer l'effet du facteur de délamination F_d . Dans d'autres travaux récents, Belaadi et al.

[22] ont développé un modèle ANN pour évaluer les interactions des paramètres de coupe afin d'analyser la délamination. Dans leurs tests, les dommages à la sortie du trou ont été mesurés à l'aide d'un scanner haute résolution, puis traités par Image J pour calculer le facteur de délamination. Les résultats ont révélé que la délamination est sensible à chaque paramètre de coupe.

Par conséquent, la nouveauté de cette étude est de se concentrer sur l'influence des paramètres de perçage sur le facteur de délamination des structures biosandwich utilisant des noyaux agglomérés de liège avec de l'époxy renforcé avec des fibres de jute tissées (WJF). Deux outils de diamètres différents ont été choisis : des forets conventionnels HSS-TiN (acier rapide revêtu de nitrure de titane) et des forets à bois (brad & spur), afin d'estimer l'influence et l'interaction simultanée des paramètres d'entrée sur le facteur F_d . En effet, la méthodologie de surface de réponse (RSM) est utilisée pour estimer l'influence et l'interaction des paramètres de coupe sur la délamination en sortie du trou. Enfin, des fonctions d'optimisation telles que la désirabilité basée sur la méthode RSM, la fonction f_{mincon} et l'algorithme génétique (GA) ont été employées pour confirmer la combinaison optimale des paramètres de coupe (f , N et d) dans les structures biosandwich étudiées dans ce travail.

IV.2 Méthodes et techniques expérimentale

IV.2.1 Procédure expérimentale de perçage

Les essais de perçage ont été réalisés avec une perceuse universelle MOMAC utilisant une broche de 1400 tours/minute et une vitesse d'avance de 4,6 à 1040 mm/tour [21], [22], et tous les perçages ont été effectués sur cette machine. Afin de réduire la flexion des pièces (et donc de ne pas inclure l'influence de ce paramètre structurel dans cette étude) lors du perçage du trou, un support solide en acier a été utilisé sous les pièces du sandwich pour éviter d'amplifier la taille du défaut à la sortie du trou. Pour réaliser les essais de perçage, nous avons besoin d'une pièce (EBJWC) de taille géométrique de $290 \times 100 \times 20$ mm³, et un dispositif de fixation de la pièce est présenté dans la Figure IV-1. Des forets Brad & éperon et hélicoïdaux HSS-TiN de différents diamètres (5 mm, 7 mm et 10 mm) ont été utilisés dans cette étude, dont la forme et la géométrie de l'outil sont présentées dans la Figure IV-1. Est important de noter que le perçage des trous dans cette étude est réalisé en une seule phase (étape). Afin d'obtenir des trous de haute qualité et de prévenir le facteur d'usure de l'outil de perçage, le foret a été remplacé par un nouveau foret après quatre à cinq opérations. Le perçage a été effectué à sec, sans liquide de refroidissement. En outre, d'autres paramètres ont été utilisés, tels que des

vitesses de coupe de 355, 710 et 1400 tr/min et trois vitesses d'avance que nous avons choisies (50, 108 et 190 mm/min). La sélection des paramètres d'usinage a été basée sur une revue de la littérature, qui est présentée dans le [Tableau IV-1](#). Ensuite, les échantillons percés ont été numérisés avec un scanner haute résolution jusqu'à 2400×4800 dpi (profondeur de couleur interne de 48 bits) afin d'obtenir une image de haute qualité. Les résultats de la numérisation de l'image sont importés et traités dans Image J (logiciel gratuit v1.47, publié par le National Institute of Health, USA [50][51][64]) pour mesurer la surface endommagée du trou percé F_d , et le facteur de seuil a été ajusté pour indiquer la délamination entourant le trou. La délamination est un défaut de dommage principal dans le perçage des composites laminés. La procédure utilisée pour acquérir différentes zones endommagées dans un trou percé est présentée dans la [Figure IV-1](#). Le dommage (délamination) a été estimé en termes de facteur de délamination (F_d). Le facteur de délamination à la sortie a été déterminé par l'équation suivante

$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \quad (1)$$

Où D est le diamètre nominal du trou percé, D_{max} est le diamètre maximal de délamination et F_d est un facteur de délamination conventionnel.



Figure IV-1 Disposition schématique du perçage de la structure du biosandwich.

Tableau IV-1 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 d (mm)	Vitesse d'avance f (mm/tr)	Vitesse de coupe N (tr/min)	
Epoxy	Jute unidirectionnel	-	HSS forets hélicoïdaux	6, 8, 10	50, 150, 250 (mm/min)	1000, 2000, 3000	[49]
Polyester	Tissu de jute traité et non traité	30	HSS forets hélicoïdaux	6	0,03 0,06 0,09 0,12	9,42 15,07 20,72 26,36 (m/min)	[50]
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	[51]
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	[52]
Epoxy	Tissu de jute	43	HSS foret hélicoïdal CoroDrill 854, N ₂ OC CoroDrill 856, N ₂ OC	8	0,05 0,10 0,15	750, 1250, 1750	[65]
Polyester	Verre-sisal-jute	-	Brad & Spur, carbure revêtu	6, 9, 12	0,04 0,06 0,08	1000, 2000, 3000	[66]
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	[67]
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	[68]
Epoxy	Verre-lin-jute	-	Forets en carbure	6, 8, 10	0,1 0,2 0,3	600, 1200, 1800	[69]
Polyester	Fibre de jute courte 5, 10 et 15 mm	40	Forets Brad & Spur Forets hélicoïdaux	5, 7, 10	50, 108, 190 (mm/min)	355, 710, 1400	[21]
Epoxy	Tissu de jute (210 g/m ²)	40	Forets Brad & Spur forets hélicoïdaux (HSS) forets hélicoïdaux (HSS-TiN)	5, 7, 10	50, 108, 190 (mm/min)	355, 710, 1400	[22]
Polyester	Tissu de jute et fibres d'acier	-	HSS, 90°, 120°, 150°	8, 10, 12	0,1 0,2 0,3	500, 1250, 2000	[70]
Polypropylène	Jute unidirectionnel	30	HSS, Co-HSS	2, 3, 4	0,1 0,2 0,3	600 1260 2700	[71]
Epoxy	Tissu de jute et lin	-	HSS, HSS-TiN, WC	4	0,01 0,015 0,020	2500, 5000, 7500	[72]
Epoxy	Tissu de jute (160 g/m²) et liège	30	Forets Brad & Spur forets hélicoïdaux (HSS-TiN)	5, 7, 10	50, 108, 190 (mm/min)	355, 710, 1400	Ce travail

Un réseau orthogonal (L_{27}) de plan composite central (CCD) a été adopté comme plan expérimental dans cette étude. Il a été choisi pour réduire le nombre d'expériences. Par conséquent, le coût et le temps de l'expérience ont été minimisés. Pour les trois facteurs, à savoir le diamètre du foret (d), la vitesse de coupe (N) et la vitesse d'avance (f), trois niveaux pour chaque facteur ont été envisagés dans cette étude. (Tableau IV-2).

Tableau IV-2 Conception des expériences.

n°	Facteurs	Notation	Unité	Niveaux		
				-1	0	+1
				Plus bas	Central	Plus élevé
1	Vitesse de coupe	N	tr/min	355	710	1400
2	Vitesse d'avance	f	mm/min	50	108	190
3	Diamètre du foret	d	Mm	5	7	10

IV.3 Résultats et discussion

IV.3.1 Influence des paramètres de perçage sur le facteur de délaminage

Figure IV- 2 illustre l'état des trous percés à l'entrée et à la sortie (#4, #13 et #22) avec des vitesses d'avance de 50, 108 et 190 mm/min et une vitesse de coupe de 355 rpm. Des images numériques des plaques de biosandwich usinées ont été prises avec une résolution de 4800 pixels à l'aide d'un scanner professionnel. Deux cercles concentriques ont été dessinés à l'aide d'un logiciel de traitement d'images. Les dommages causés par le perçage des trous lors de la fabrication des biosandwiches font partie du facteur de délamination. Celui-ci est conditionné par le choix des paramètres de coupe ainsi que par le tissu fibreux utilisé. La délamination est une préoccupation fondamentale pour le choix des paramètres de coupe lors du processus de conception. La détermination du facteur de délamination F_d des structures biosandwich avec un noyau de liège aggloméré avec des peaux époxy renforcées de jute tissé (EBJWC) pour deux forets utilisant HSS-TiN et BSD est liée à de nombreux facteurs tels que l'avance, la vitesse de coupe et le diamètre de l'outil.

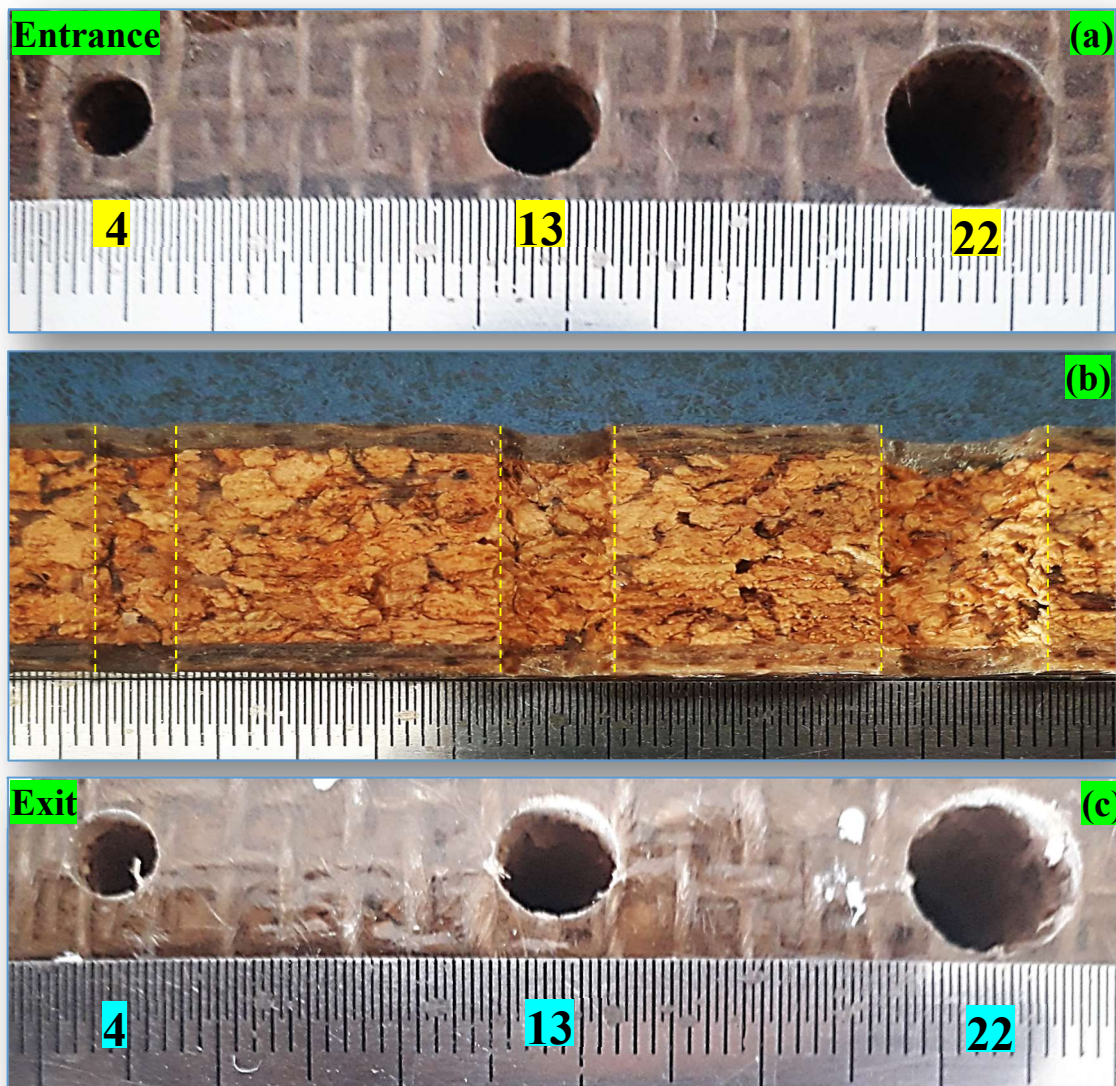


Figure IV-2 Trous typiques percés sur une plaque biosandwich jute/liège/époxy (a) entrée (b) section transversale et (c) sortie de délamination pour trois essais (#4, #13 et #22).

IV.3.2 Méthodologie de surface de réponse et ANOVA pour le facteur de délamination

Les résultats expérimentaux ont été traités en utilisant une analyse de surface de réponse et pour déterminer la relation entre le délaminage et les différents paramètres de coupe pour HSS-TiN et BSD. Le [Tableau IV-3](#) montre les paramètres de sortie représentés par le facteur de délamination pour les deux forets utilisés dans la présente étude, $F_d(\text{HSS-TiN})$ et $F_d(\text{BSD})$, réalisés dans différentes conditions d'usinage. Ces résultats ont été obtenus selon la conception optimale, qui consiste à analyser l'influence des facteurs numériques sur les réponses avec trois niveaux et trois paramètres d'entrée (f , N et d). En effet, la méthodologie de surface de réponse (RSM) est une méthode mathématique et statistique qui est généralement utilisée dans les sciences appliquées et les problèmes analytiques tels que la mécanique et l'usinage des matériaux [76]. En

outre, cette technique représente une approche de modélisation empirique avec l'objectif de trouver la relation entre les paramètres d'entrée et de sortie, c'est-à-dire la délamination F_d , en changeant les différents paramètres de coupe pendant le perçage des biosandwiches.

Tableau IV-3 Résultats expérimentaux pour le facteur de délamination des trous percés à la sortie.

Numéro de test	Variables d'entrée			Variables de sortie			
	f (mm/min)	N (tr/min)	d (mm)	$F_{d(HSS-TiN)}$		$F_{d(BSD)}$	
				EXP	RSM	EXP	RSM
1	50	355	5	1,084	1,087	1,132	1,154
2	108	355	5	1,176	1,152	1,194	1,287
3	190	355	5	1,312	1,309	1,485	1,468
4	50	710	5	1,025	1,107	1,113	1,051
5	108	710	5	1,218	1,173	1,221	1,193
6	190	710	5	1,334	1,333	1,358	1,387
7	50	1400	5	1,045	1,092	1,117	1,034
8	108	1400	5	1,201	1,163	1,141	1,195
9	190	1400	5	1,355	1,328	1,423	1,416
10	50	355	7	1,127	1,086	1,306	1,280
11	108	355	7	1,181	1,168	1,413	1,412
12	190	355	7	1,321	1,350	1,678	1,591
13	50	710	7	1,117	1,109	1,121	1,194
14	108	710	7	1,217	1,193	1,429	1,335
15	190	710	7	1,320	1,377	1,479	1,528
16	50	1400	7	1,119	1,100	1,102	1,211
17	108	1400	7	1,246	1,188	1,387	1,370
18	190	1400	7	1,302	1,378	1,594	1,589
19	50	355	10	1,136	1,161	1,199	1,256
20	108	355	10	1,206	1,270	1,431	1,386
21	190	355	10	1,464	1,488	1,559	1,563
22	50	710	10	1,298	1,188	1,277	1,196
23	108	710	10	1,279	1,298	1,301	1,335
24	190	710	10	1,481	1,520	1,443	1,525
25	50	1400	10	1,171	1,188	1,272	1,263
26	108	1400	10	1,275	1,302	1,414	1,420
27	190	1400	10	1,555	1,529	1,684	1,637

Les équations mathématiques de la régression sont présentées dans le [Tableau IV-4](#) pour les différents facteurs de délamination obtenus par le logiciel Design-Expert, qui a recommandé des modèles quadratiques. Les modèles de régression quadratiques sont des modèles mathématiques de second ordre basés sur le RSM.

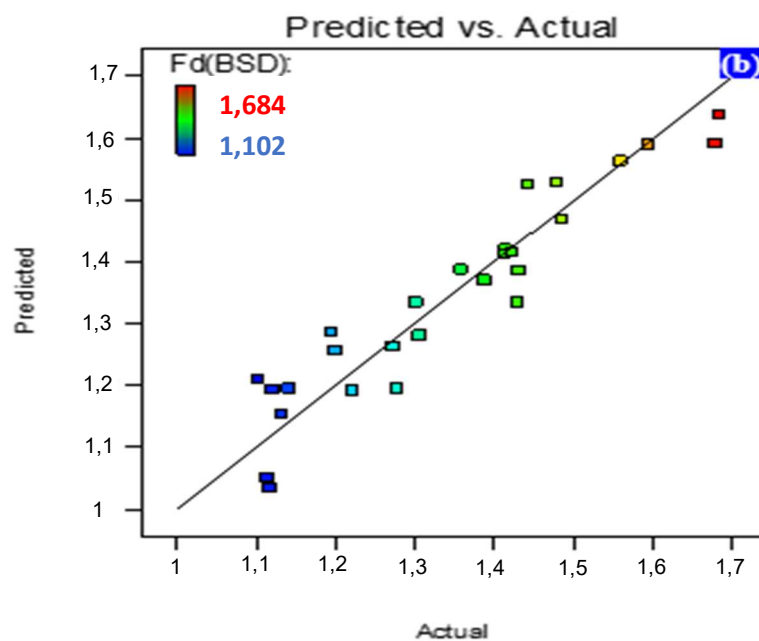
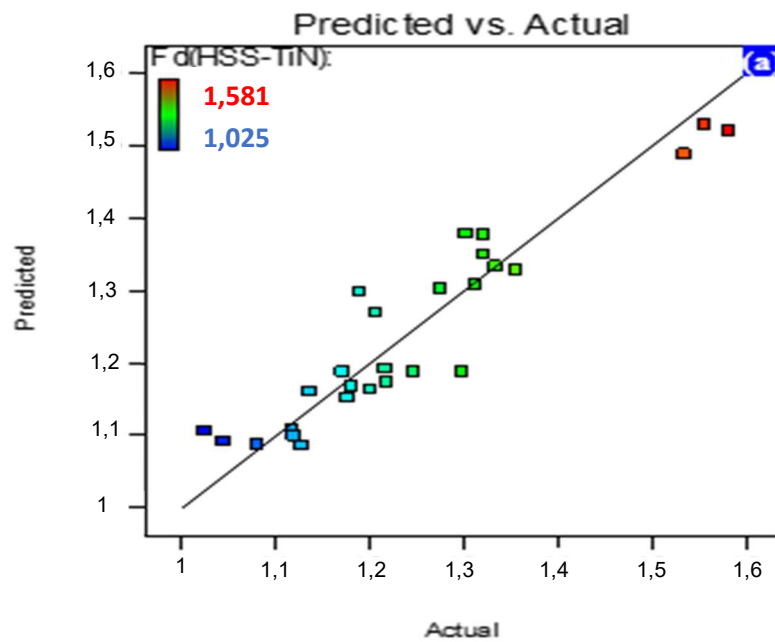
[Tableau IV-4](#) Modèles mathématiques pour le facteur de délamination pour le perçage de la structure biosandwich tissu de jute-liège/époxy obtenus avec la méthode RSM.

RSM réponse	Géométrie de perçage
	HSS-TiN
F_d	$1,252 - 0,579 \times 10^{-3} \times f + 0,106 \times 10^{-3} \times N - 0,070 \times d + 1,016 \times 10^{-7} \times f \times N + 1,504 \times 10^{-4} \times f \times d + 4,110 \times 10^{-6} \times N \times d + 5,725 \times 10^{-6} \times f^2 - 7,276 \times 10^{-8} \times N^2 + 0,005 \times d^2$
	BSD
F_d	$+0,442 + 2,258 \times 10^{-3} \times f - 0,709 \times 10^{-3} \times N + 0,225 \times d + 4,631 \times 10^{-7} \times f \times N - 1,100 \times 10^{-5} \times f \times d + 2,425 \times 10^{-5} \times N \times d - 5,286 \times 10^{-7} \times f^2 + 2,565 \times 10^{-7} \times N^2 - 0,014 \times d^2$

[Tableau IV-4](#) montre les résultats du modèle ANOVA quadratique. Le coefficient R^2 et le coefficient R^2 ajusté correspondant au délaminage sont respectivement de 87,59% et 81,02% pour HSS-TiN et 89,35% et 83,71% pour BSD. Il est donc évident que ce modèle de régression offre une bonne correspondance entre les réponses et les facteurs indépendants.

Le modèle est statistiquement significatif car la valeur p correspondant au modèle est inférieure à 0,05. De plus, les facteurs f et d ont des effets significatifs sur la délamination. En raison de la plus grande valeur de F_d , il apparaît que la vitesse d'avance f et le diamètre d sont les paramètres les plus significatifs pour la délamination des composites HSS-TiN et BSD par rapport à N . Le reste des termes du modèle est considéré comme non significatif. Par conséquent, il apparaît que la vitesse d'avance est le principal paramètre qui affecte le facteur de délaminage, suivi par le diamètre et la vitesse de coupe (N). En outre, la contribution du facteur f est la plus importante (66,04% et 66,03%) pour HSS-TiN et BSD. La vitesse de coupe a une influence moins significative sur le délaminage que le diamètre sur le délaminage.

Figures IV-3a et b mettent en évidence la relation entre les résultats prédits et expérimentaux pour la délamination de la structure biosandwich des forets HSS-TiN et BSD. Ainsi, les résultats obtenus montrent un accord satisfaisant du modèle de régression puisque les valeurs prédites sont statistiquement identiques aux valeurs expérimentales avec un niveau de confiance de 95%. Les courbes de probabilité normales des résidus de délamination F_d sont présentées sur les Figures IV-3c et d ; les lignes droites révèlent une bonne distribution des erreurs. La synthèse de la pertinence des résultats révèle que le modèle quadratique est statistiquement significatif pour l'analyse de la délamination.



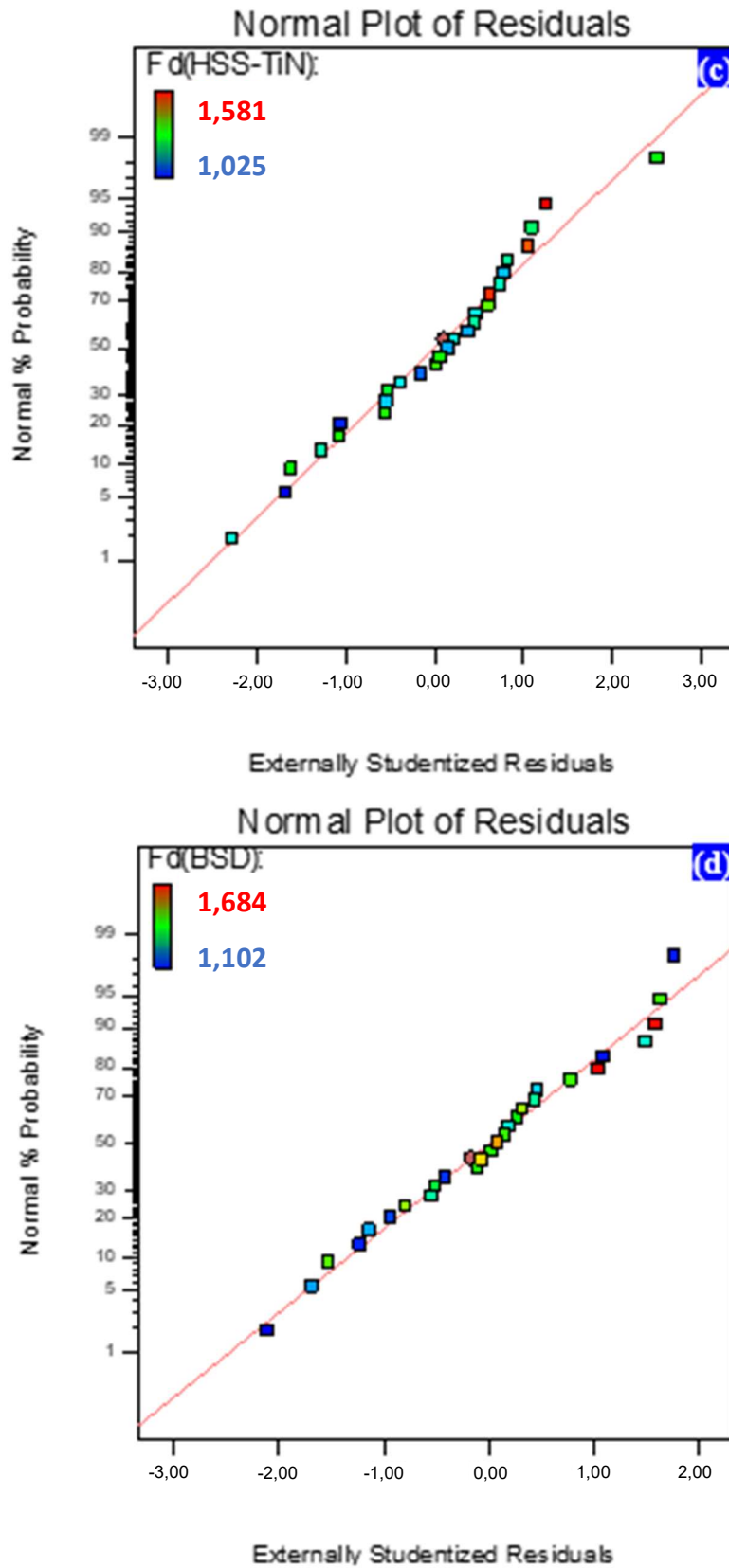


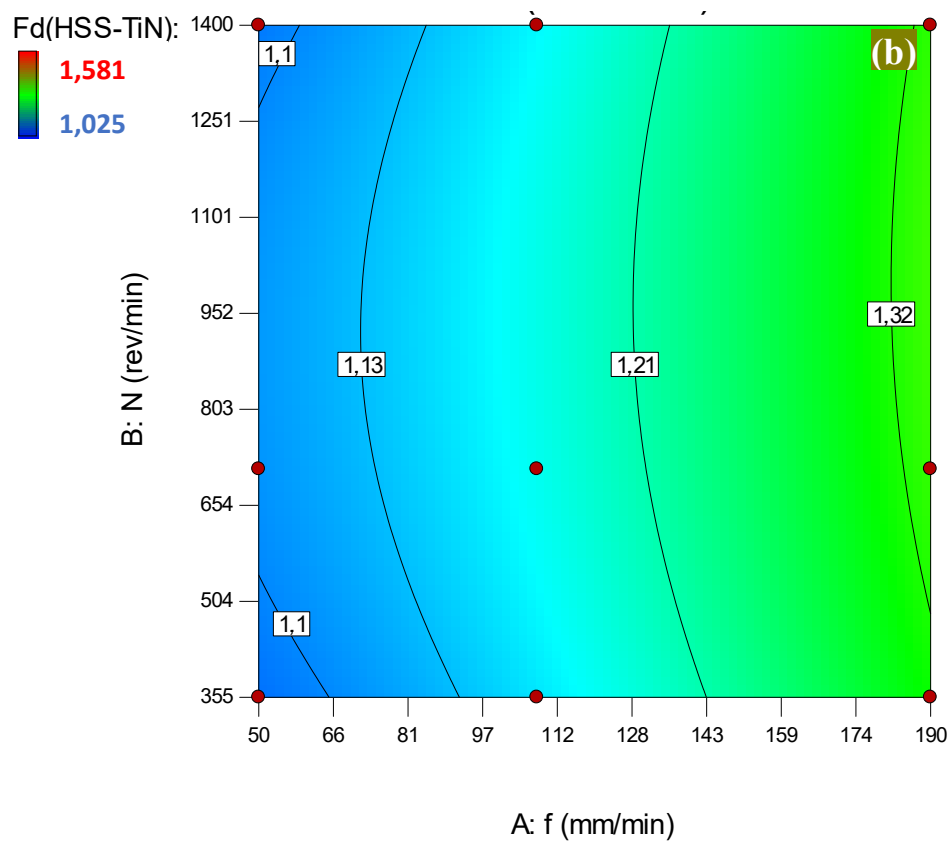
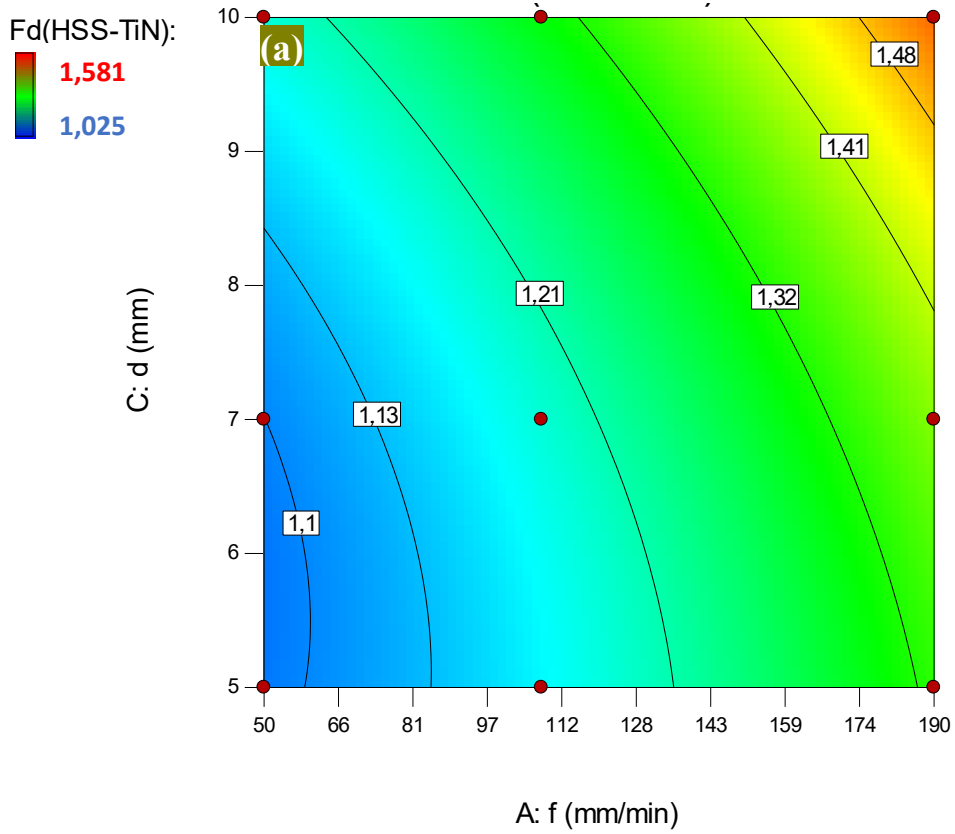
Figure IV-3 (a,b) Valeurs prédites par rapport aux valeurs réelles et (c,d) Distribution de probabilité normale des résidus Fd pour les différents forets utilisés dans ce travail.

IV.3.3 Tracés de surface 3D pour le facteur de délamination

Figures IV-4 et 5 décrivent une cartographie sous forme de surfaces de réponses fournies pour le délaminage à la sortie des biosandwiches usinés par les forets HSS-TiN et BSD en fonction de l'avance (f) et de la vitesse de coupe (N) et du diamètre (d). Pour l'outil HSS-TiN, le délaminage ne dépasse pas 1,10 avec une avance comprise entre 50 et 60 mm/min et un diamètre de 5 à 7 mm, mais en outre, le délaminage dépasse 1,48 lorsque la vitesse de coupe est comprise entre 178 et 190 mm/min et un diamètre de 9,4 à 10 mm (Figure IV-4a). Pour l'outil BSD, nous remarquons également que le délaminage ne dépasse pas 1,09 pour des avances comprises entre 50 et 70 mm/min et un diamètre de 5 à 5,5 mm, mais il dépasse 1,62 lorsque la vitesse de coupe est comprise entre 185 et 190 mm/min et un diamètre de 7,8 à 10 mm (Figure IV-5a).

Figures IV-4b et 5b montrent comment la vitesse d'avance et la vitesse de coupe affectent significativement le délaminage pour les forets HSS-TiN et BSD. On peut voir que le délaminage augmente significativement avec l'augmentation de la vitesse d'avance et très légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Pour HSS-TiN et BSD, le délaminage est inférieur à 1,10 lorsque la vitesse d'avance est comprise entre 50 et 64 mm/min et que la vitesse de coupe est comprise entre 355 et 1400 tr/min et est de 1,09 pour BSD lorsque la vitesse d'avance est comprise entre 50 et 75 mm/min et que N est compris entre 562 et 1400 tr/min. Le délaminage semble également dépasser 1,32 pour HSS-TiN lorsque l'avance est comprise entre 182 et 190 mm/min et que N est compris entre 510 et 1400 tr/min et est égal à 1,43 pour BSD lorsque l'avance est comprise entre 174 et 190 mm/min et que la vitesse de coupe est comprise entre 355 et 1400 tr/min. Ceci correspond parfaitement aux résultats obtenus dans les travaux de Belaadi et al. [21], [22] dans le cas des biocomposites époxy/tissu de jute pour les mêmes conditions de coupe.

L'effet du diamètre de l'outil de perçage et de la vitesse de coupe (N) sur le délaminage est montré dans les figures Figures IV-4c et 5c. D'après cette figure, il apparaît que le délaminage augmente lorsque le diamètre augmente et augmente légèrement avec l'augmentation de N . Le délaminage est inférieur à 1,32 et 1,47, lorsque le diamètre de l'outil (d) et la vitesse de coupe sont compris entre 5 et 5,8 mm et 355 et 484 rpm pour l'outil HSS-TiN et 5 et 5,7 mm et 355 et 1400 rpm pour le foret BSD, respectivement. De plus, il est également observé que F_d semble dépasser 1,52 et 1,62 lorsque d et N sont compris entre 9,8-10 mm et 790-1400 rpm pour HSS-TiN et 7,8-10 mm et 1295-1400 rpm pour BSD, respectivement.



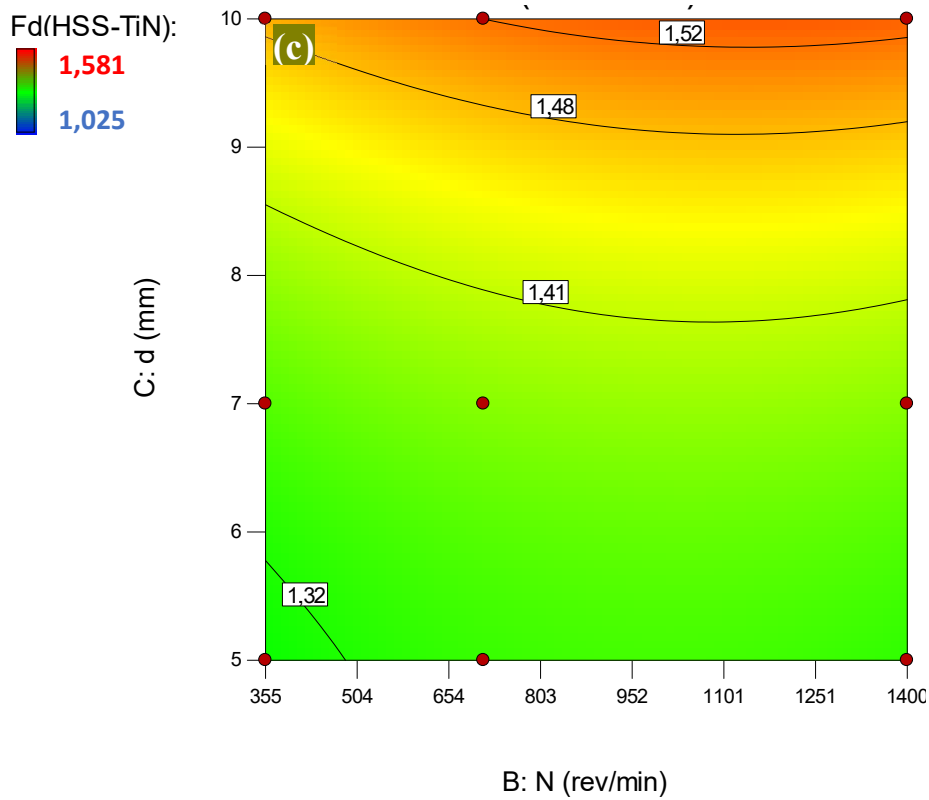
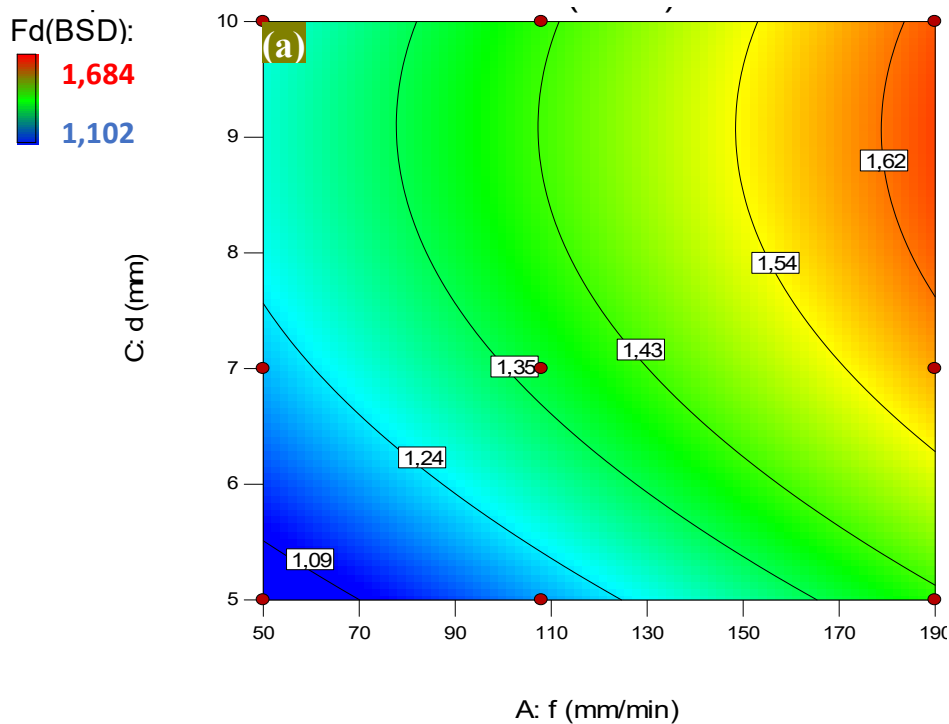


Figure IV-4 (a,b) Représentation des surfaces de réponse des données Fd avec le foret HSS-TiN : (a) Vitesse d'avance en fonction du diamètre du foret, (b) Vitesse d'avance en fonction de la vitesse de coupe, (c) Vitesse de coupe en fonction du diamètre du foret.



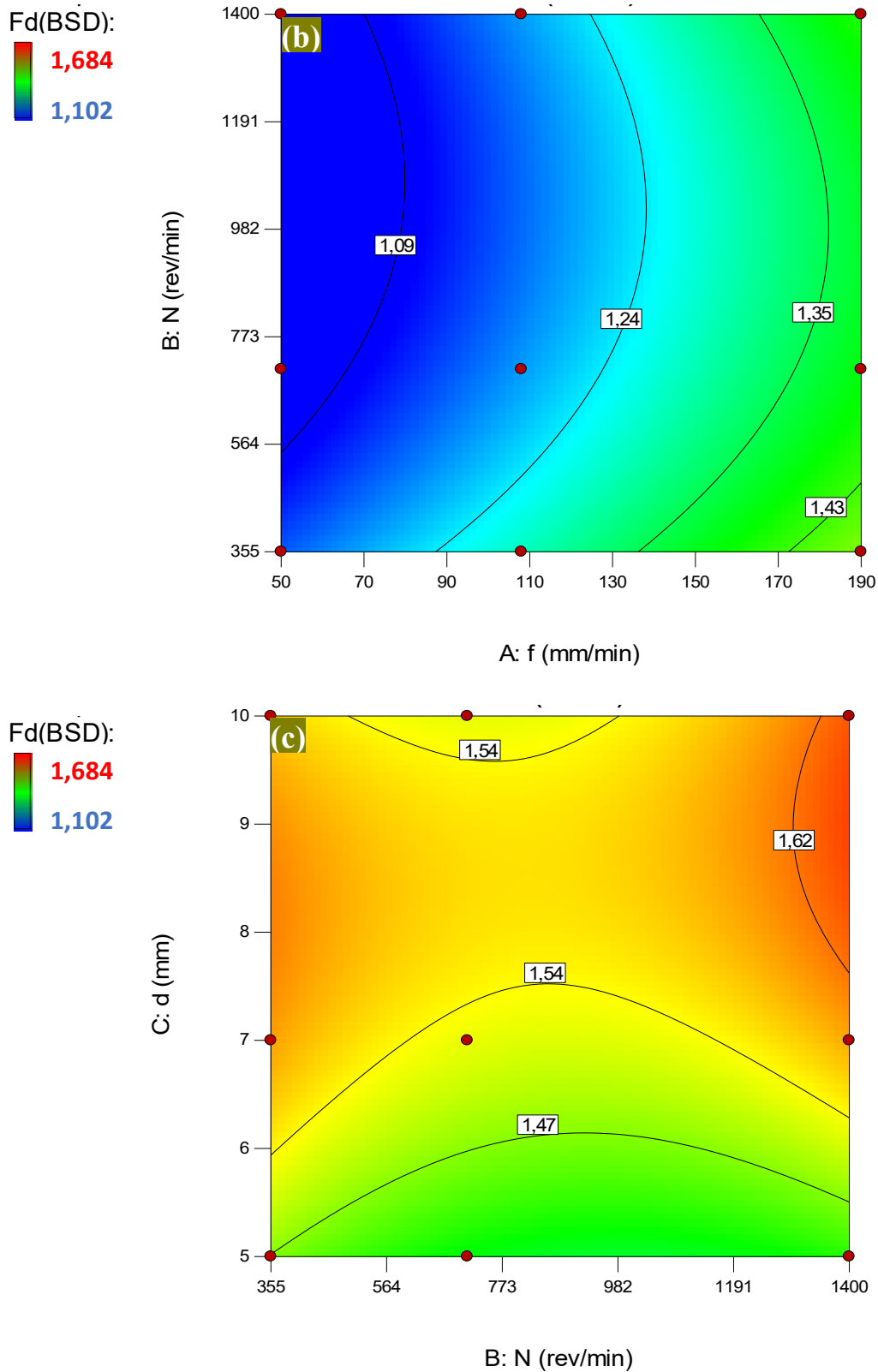
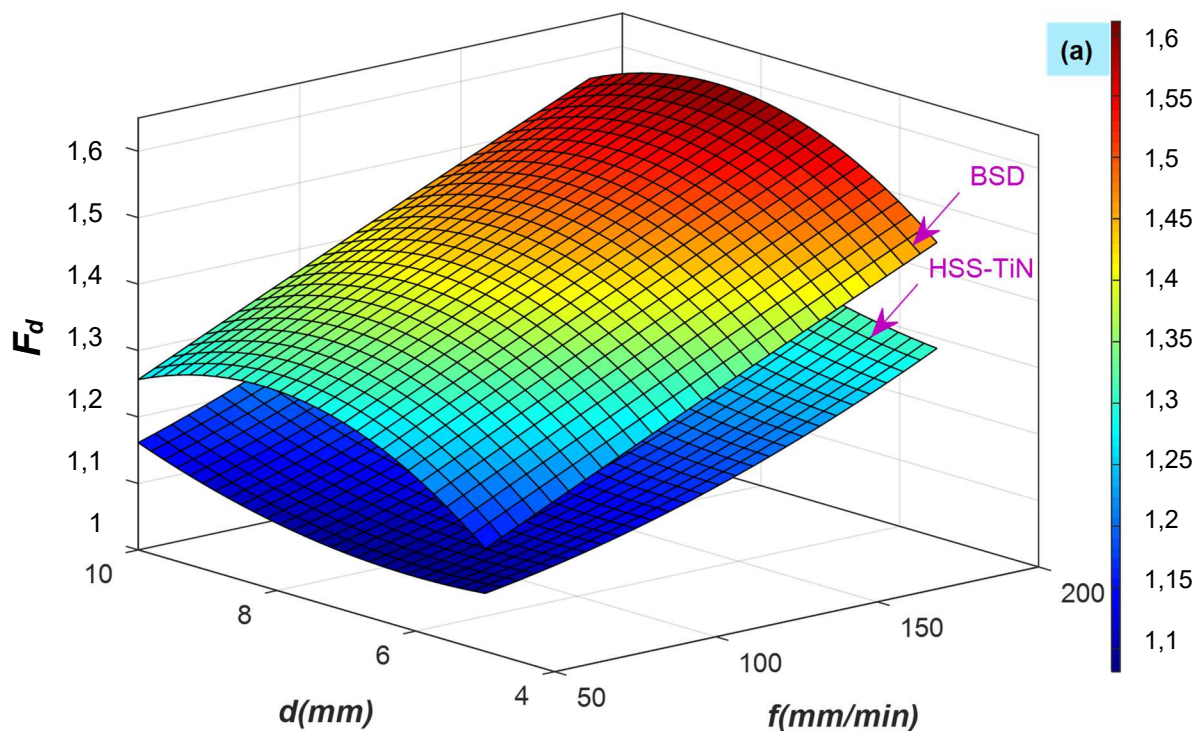


Figure IV-5 Représentation des surfaces de réponse des données F_d avec le foret BSD : (a) Vitesse d'avance en fonction du diamètre du foret, (b) Vitesse d'avance en fonction de la vitesse de coupe, (c) Vitesse de coupe en fonction du diamètre du foret.

La Figure IV-6 présente l'évolution du facteur de délaminage en fonction des paramètres de coupe tels que la vitesse d'avance (f), la vitesse de coupe (N) et le diamètre (d). Le facteur de délaminage augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance et du diamètre du foret, comme le montre la Figure IV-6a. L'influence de ces deux conditions de coupe (f et d) est également considérable ; ceci est principalement dû aux forces produites et à la quantité de matière enlevée pendant l'usinage. La Figure IV-6b illustre l'effet du diamètre du foret et de la vitesse de coupe sur F_d pour les deux forets comprenant HSS-TiN et BSD pour une avance constante. Le diamètre du foret a une grande influence sur la vitesse de coupe, comme le montre clairement la Figure IV-6b pour le premier foret (HSS-TiN). Dans le cas où le diamètre du foret est maintenu constant (Figure IV-6c), le facteur F_d augmente avec l'effet croissant de la vitesse d'avance. D'autre part, en augmentant la vitesse de coupe, le facteur de délaminage diminue. De manière générale, il ressort de la Figure IV-6 que le foret HSS-TiN ($\approx 1,02$ à $1,55$) produit des valeurs de F_d plus faibles que le foret BSD ($\approx 1,11$ à $1,68$).



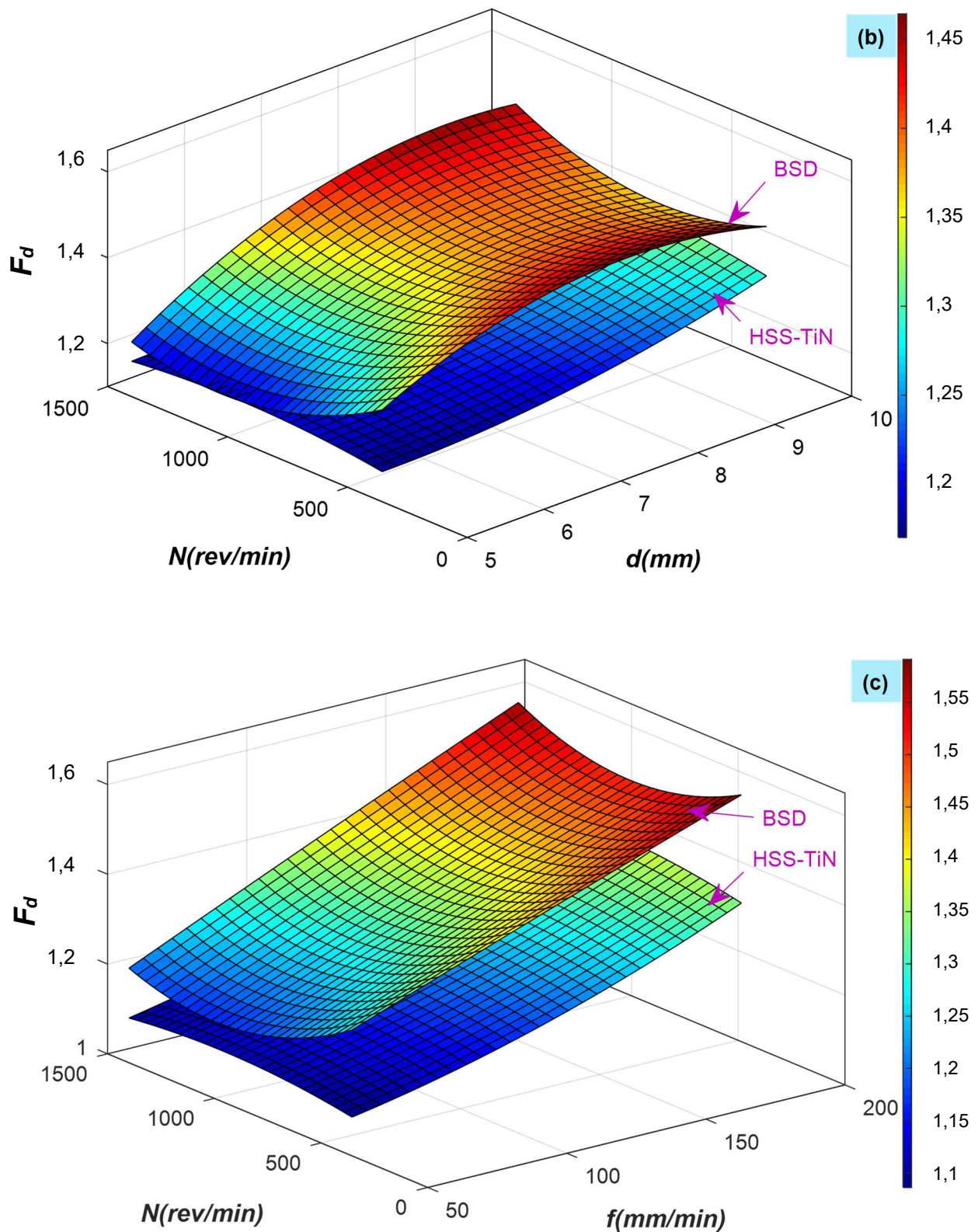


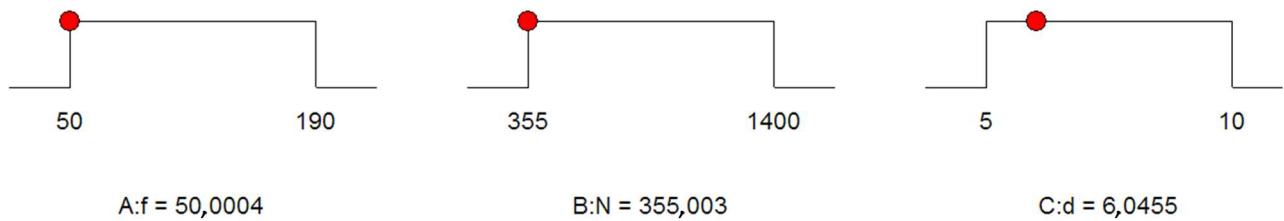
Figure IV-6 Tracés de surface 3D du facteur de délaminage en fonction de f , N et d des structures biosandwiches.

Tableau IV-5 ANOVA pour le modèle quadratique de surface de réponse pour le facteur de délamination.

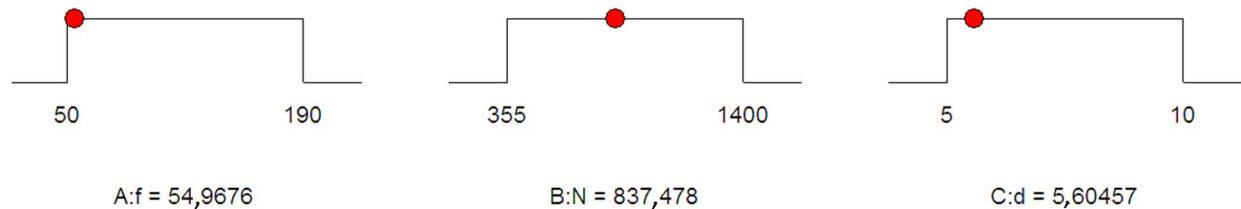
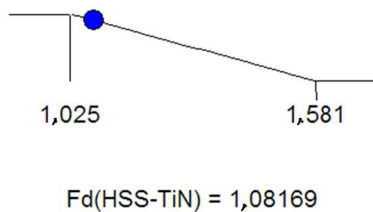
Source	DF	SS	MS	Valeur F	Valeur P	Cont. %	Remarques
a) ANOVA pour le facteur de délamination de HSS-TiN							
Model	9	0,47	0,052	13,34	< 0,0001		Significatif
<i>f</i>	1	0,35	0,35	89,92	< 0,0001	66,04	Significatif
<i>N</i>	1	2,338E-003	2,338E-003	0,60	0,4483	0,30	
<i>d</i>	1	0,083	0,083	21,47	0,0002	10,54	Significatif
<i>f</i> × <i>N</i>	1	1,732E-004	1,732E-004	0,045	0,8352	0,02	
<i>f</i> × <i>d</i>	1	8,508E-003	8,508E-003	2,19	0,1570	1,08	
<i>N</i> × <i>d</i>	1	3,626E-004	3,626E-004	0,093	0,7635	0,05	
<i>f</i> × <i>f</i>	1	4,405E-003	4,405E-003	1,14	0,3016	0,56	
<i>N</i> × <i>N</i>	1	1,843E-003	1,843E-003	0,47	0,5000	0,23	
<i>d</i> × <i>d</i>	1	5,568E-003	5,568E-003	1,43	0,2474	0,71	
Erreur	17	0,066	3,880E-003				
Total	26	0,53					
<i>SD</i> = 0,062				$R^2 = 87,59\%$			
Mean = 1,245				R^2 ajusté = 81,02%			
Coefficient de variation = 4,999%				R^2 prédit = 70,51%			
Erreur résiduelle prédite de la somme des carrés (PRESS) = 0,156				précision adéquate = 11,681			
c) ANOVA pour le facteur de délamination de BSD							
Model	9	0,7036	0,0782	15,8494	0,0000		Significatif
<i>f</i>	1	0,5200	0,5200	105,4197	0,0000	66,03	Significatif
<i>N</i>	1	0,0024	0,0024	0,4799	0,4978	0,30	
<i>d</i>	1	0,1152	0,1152	23,3487	0,0002	14,63	Significatif
<i>f</i> × <i>N</i>	1	0,0036	0,0036	0,7290	0,4051	0,46	
<i>f</i> × <i>d</i>	1	0,0000	0,0000	0,0092	0,9246	0,00	
<i>N</i> × <i>d</i>	1	0,0126	0,0126	2,5587	0,1281	1,60	
<i>f</i> × <i>f</i>	1	0,0000	0,0000	0,0076	0,9315	0,00	
<i>N</i> × <i>N</i>	1	0,0229	0,0229	4,6458	0,0458	2,91	
<i>d</i> × <i>d</i>	1	0,0430	0,0430	8,7090	0,0089	5,46	
Erreur	17	0,0839	0,0049				
Total	26	0,7875					
<i>SD</i> = 0,070				$R^2 = 89,35\%$			
Mean = 1,343				R^2 ajusté = 83,71%			
Coefficient de variation = 5,23%				R^2 prédit = 73,49%			
Erreur résiduelle prédite de la somme des carrés (PRESS) = 0,208				précision adéquate = 14,101			

IV.3.4 Optimisation des réponses

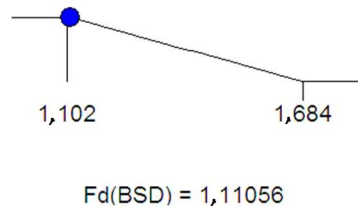
Les Figures IV-7a et b illustrent la distribution de la fonction de rampe et la cartographie du contour de désirabilité pour les deux types de matériaux de perçage ainsi que leur combinaison dans la Figure IV-7c. L'objectif principal de l'optimisation est de déterminer les paramètres de coupe ainsi que la minimisation des facteurs de délamination.



(a) Desirability = 0,898



(b) Desirability = 1,000



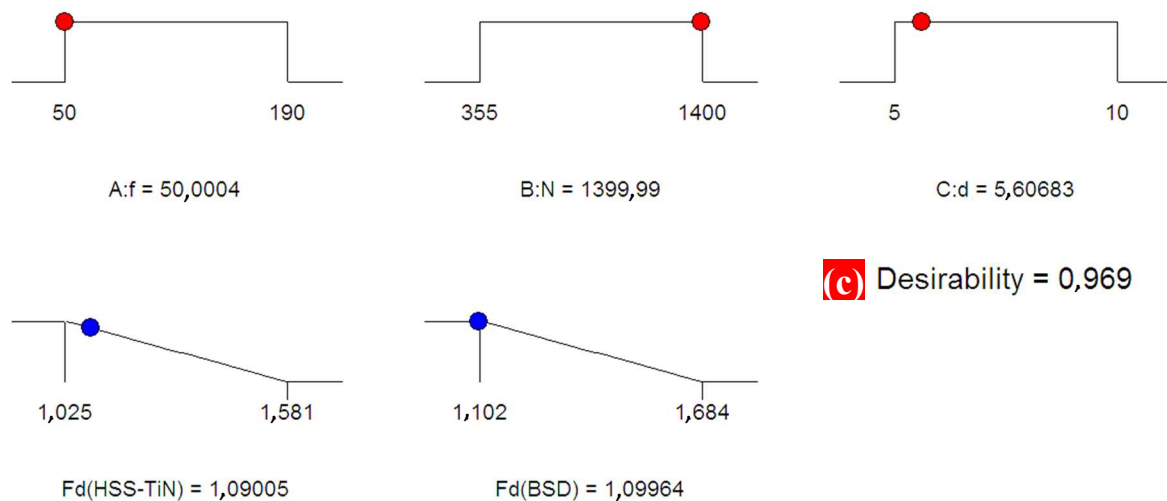


Figure IV-7 Graphique de fonction de rampe 3D de l'optimisation multi-objectif pour (a) les outils HSS-TiN, (b) BSD et (c) HSS-TiN et BSD.

Les paramètres de coupe utilisés dans le processus d'optimisation sont présentés dans le [Tableau IV-6](#), et les valeurs optimisées des facteurs et des réponses sont présentées dans le [Tableau IV-7](#). Les dix essais sont choisis en raison du facteur de désirabilité proche de l'unité. Les dix premiers tests montrent qu'une vitesse de coupe et une avance élevées ainsi qu'un petit diamètre d'outil sont appropriés pour réduire le facteur de délamination avec des taux de désirabilité de 0,98 et 1,00 pour HSS-TiN et BSD, respectivement. ([Figures IV-8a et b](#)). En effet, selon la valeur de désirabilité la plus élevée égale à 0,97, les conditions optimales d'usinage par perçage selon le [Tableau IV-7](#) ($f = 50$ mm/min, $N = 1399,99$ tours/min et $d = 5,61$ mm) conduisent à une délamination (F_d) minimale pour HSS-TiN et BSD, dont les valeurs étaient de 1,09 et 1,10, respectivement.

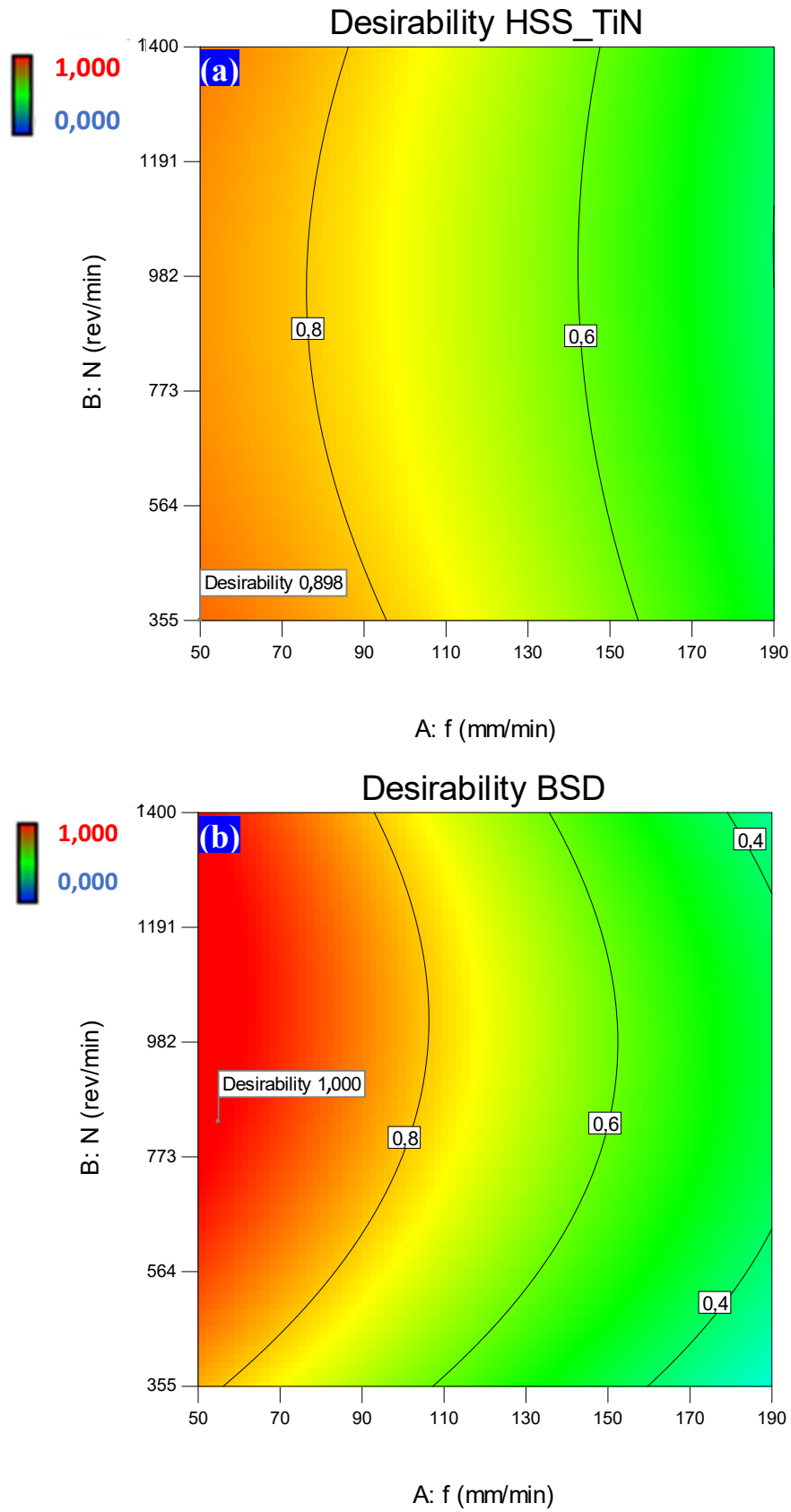


Figure IV-8 Tracé des contours de la désirabilité de Fd pour (a) les outils HSS-TiN et (b) BSD.

Tableau IV-6 Objectifs et plages de paramètres pour l'optimisation RSM des conditions de coupe.

Condition	Objectif	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse d'avance, f (mm/min)	dans la gamme	50	190
Vit. de coupe, N (tr/min)	dans la gamme	355	1400
Foret, d (mm)	dans la gamme	5	10
$F_{d(\text{HSS-TiN})}$	Minimiser	1,025	1,581
$F_{d(\text{BSD})}$	Minimiser	1,102	1,684

Tableau IV-7 Optimisation des paramètres de réponse à l'aide du RSM.

Test n°	Paramètres d'usinage			Paramètres de réponse		Désirabilité
	f (mm/min)	N (tr/min)	d (mm)	$F_{d(\text{HSS-TiN})}$	$F_{d(\text{BSD})}$	
1	50,000	1399,987	5,607	1,090	1,100	0,969
2	50,006	1399,971	5,629	1,090	1,102	0,969
3	50,000	1399,992	5,579	1,090	1,097	0,969
4	50,001	1399,999	5,508	1,090	1,090	0,969
5	50,001	1399,982	5,312	1,091	1,069	0,969
6	50,553	1400,000	5,610	1,091	1,101	0,969
7	50,000	1399,645	5,226	1,091	1,060	0,969
8	50,001	1399,989	5,146	1,091	1,051	0,969
9	50,000	1394,381	5,225	1,091	1,059	0,969
10	50,001	1399,983	5,085	1,092	1,044	0,969

Les modèles obtenus par la méthode RSM ont été retenus pour la résolution du problème d'optimisation par l'algorithme génétique (GA) et pour la recherche de la fonction de contrainte non linéaire multi-variable minimale (fmincon) à l'aide du logiciel MATLAB. [Tableau IV-8](#) montre les résultats obtenus à partir de l'optimisation des paramètres d'entrée et de F_d pour les deux géométries de foret (HSS-TiN et BSD). Les résultats révèlent en effet que la réponse des paramètres GA et fmincon fournissent des valeurs approximativement similaires. Les résultats de la comparaison entre les paramètres de réponse (F_d) obtenus pour les outils HSS-TiN et BSD avec RSM et ceux prédits par l'algorithme GA et fmincon sont respectivement de 1,08 et 1,03 obtenus par RSM, 1,04 et 1,05 dans le cas de GA et 1,04 et 1,09 pour la fonction fmincon, confirmant la pertinence des modèles et l'adéquation des résultats avec ceux obtenus par [21].

[Tableau IV-8](#) Comparaison des techniques d'optimisation des réponses : RSM, GA et optimisation fmincon.

Paramètres d'usinage			Paramètres de réponse	
f (mm/min)	N (tr/min)	d (mm)	F_d	Outils
RSM optimisation				
50,000	355,002	6,047	1,0822	HSS-TiN
57,029	1023,600	5,034	1,0351	BSD
GA optimisation				
51,162	1397,54	5,981	1,0401	HSS-TiN
51,091	1378,07	5,960	1,0489	BSD
fmincon optimisation				
50,979	1397,52	5,992	1,0404	HSS-TiN
51,109	1391,06	6,012	1,0942	BSD

IV.4 Conclusion

La présente recherche s'est concentrée sur le développement et l'optimisation des facteurs de délamination des composites polymères à fibres de jute avec deux types de forets HSS-TiN et BSD. Les résultats obtenus ci-dessus ont montré les conclusions suivantes :

- Sur la base des effets de la combinaison des paramètres de coupe dans le processus de perçage, une combinaison d'une faible vitesse d'avance et d'un petit diamètre d'outil est clairement nécessaire pour minimiser le facteur de délamination. L'importance du matériau et de la vitesse d'avance par rapport au diamètre du foret sont prédominants sur le facteur de délamination, et il a été remarqué que la vitesse de coupe n'a aucune influence sur ce dernier. La contribution des différents éléments de la condition optimale de perçage est la suivante : vitesse d'avance (66,04%), diamètre du foret (10,54%) et vitesse de coupe. La qualité de l'optimisation est considérée comme bonne avec un facteur de désirabilité global de 97%. Les résultats des modèles prédictifs et les mesures expérimentales sont en bon accord. Les pourcentages d'erreur moyens entre le modèle et les résultats expérimentaux sont de 0,26% pour le foret HSS-TiN et de 1,01% pour le foret BSD.

IV.5 Références

- [1] J. P. Manaia, A. T. Manaia, and L. Rodrigues, "Industrial Hemp Fibers: An Overview," *Fibers*, vol. 7, no. 12, 2019, doi: 10.3390/fib7120106.
- [2] G. Koronis, A. Silva, and M. Fontul, "Green composites: A review of adequate materials for automotive applications," *Compos. Part B Eng.*, vol. 44, no. 1, pp. 120–127, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.004>.
- [3] A. Shahzad, "Hemp fiber and its composites – a review," *J. Compos. Mater.*, vol. 46, no. 8, pp. 973–986, Aug. 2011, doi: 10.1177/0021998311413623.
- [4] C. Baley, A. Le Duigou, A. Bourmaud, and P. Davies, "Influence of drying on the mechanical behaviour of flax fibres and their unidirectional composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 1226–1233, 2012, doi: 10.1016/j.compositesa.2012.03.005.
- [5] A. Le Duigou and C. Baley, "Coupled micromechanical analysis and life cycle assessment as an integrated tool for natural fibre composites development," *J. Clean. Prod.*, vol. 83, pp. 61–69, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.07.027.
- [6] E. Diabor, P. Funkenbusch, and E. E. Kaufmann, "Characterization of Cassava Fiber of Different Genotypes as a Potential Reinforcement Biomaterial for Possible Tissue Engineering Composite Scaffold Application," *Fibers Polym.*, vol. 20, no. 2, pp. 217–228, 2019, doi: 10.1007/s12221-019-8702-9.
- [7] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, 2012, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.
- [8] S. Amroune, A. Belaadi, M. Bourchak, A. Makhoulouf, and H. Satha, "Statistical and Experimental Analysis of The Mechanical Properties of Flax Fibers," *J. Nat. Fibers*, doi: 10.1080/15440478.2020.1775751.
- [9] Y. Zhou, M. Fan, and L. Chen, *Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview*, vol. 101. Elsevier Ltd, 2016.
- [10] T. Rajmohan, R. Vinayagamoorthy, and K. Mohan, "Review on effect machining parameters on performance of natural fibre-reinforced composites (NFRCS)," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 32, no. 9, pp. 1282–1302, 2019, doi: 10.1177/0892705718796541.
- [11] S. Dutta, N. K. Kim, R. Das, and D. Bhattacharyya, "Effects of sample orientation on the fire reaction properties of natural fibre composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 157, pp. 195–206, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.08.118.
- [12] M. Cherief, A. Belaadi, M. Bouakba, M. Bourchak, and I. Meddour, "Behaviour of lignocellulosic fibre-reinforced cellular core under low-velocity impact loading: Taguchi method," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05393-9.
- [13] M. Boumaaza, A. Belaadi, and M. Bourchak, "The Effect of Alkaline Treatment on Mechanical Performance of Natural Fibers-reinforced Plaster: Optimization Using RSM," *J. Nat. Fibers*, 2020, doi: 10.1080/15440478.2020.1724236.
- [14] M. Jaouadi, S. M'sahli, and F. Sakli, "Optimization and Characterization of Pulp Extracted from the Agave Americana L. Fibers," *Text. Res. J.*, vol. 79, no. 2, pp. 110–120, 2009, doi: 10.1177/0040517508090781.
- [15] A. Bedjaoui, A. Belaadi, S. Amroune, and B. Madi, "Impact of surface treatment of flax fibers on tensile mechanical properties accompanied by a statistical study," *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 6, no. 11, pp. 10–17, 2019.
- [16] A. Belaadi, S. Amroune, and M. Bourchak, "Effect of eco-friendly chemical sodium bicarbonate treatment on the mechanical properties of flax fibres: Weibull statistics," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04628-8.
- [17] N. Benzannache, A. Belaadi, M. Boumaaza, and M. Bourchak, "Improving the mechanical performance of biocomposite plaster/ Washingtonian filifira fibres using the RSM method," *J.*

- Build. Eng.*, vol. 33, 2021, doi: 10.1016/j.job.2020.101840.
- [18] B. Weng *et al.*, "Properties of Natural Luffa Vine as potential reinforcement for biomass composites," *Ind. Crops Prod.*, vol. 155, p. 112840, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112840>.
- [19] M. Engineering *et al.*, "Sodium carbonate treatment of fibres to improve mechanical and water absorption characteristics of short bamboo natural fibres reinforced polyester composite composite," *Plast. Rubber Compos.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1080/14658011.2020.1768336.
- [20] K. Malik, F. Ahmad, and E. Gunister, "Drilling Performance of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: A Review," *J. Nat. Fibers*, vol. 00, no. 00, pp. 1–19, 2021, doi: 10.1080/15440478.2020.1870624.
- [21] A. Belaadi, H. Laouici, and M. Bourchak, "Mechanical and drilling performance of short jute fibre-reinforced polymer biocomposites: statistical approach," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 106, no. 5–6, 2020, doi: 10.1007/s00170-019-04761-4.
- [22] A. Belaadi, M. Boumaaza, S. Amroune, and M. Bourchak, "Mechanical characterization and optimization of delamination factor in drilling bidirectional jute fibre-reinforced polymer biocomposites," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06217-6.
- [23] Y. S. Rao, N. S. Mohan, N. Shetty, and B. Shivamurthy, "Drilling and structural property study of multi-layered fiber and fabric reinforced polymer composite - a review," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 34, no. 14, pp. 1549–1579, Oct. 2019, doi: 10.1080/10426914.2019.1686522.
- [24] H. Zhang, P. Zhu, Z. Liu, S. Qi, and Y. Zhu, "Research on prediction method of mechanical properties of open-hole laminated plain woven CFRP composites considering drilling-induced delamination damage," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–16, 2020, doi: 10.1080/15376494.2020.1745969.
- [25] N. Feito, J. Díaz-Álvarez, J. López-Puente, and M. H. Miguelez, "Experimental and numerical analysis of step drill bit performance when drilling woven CFRPs," *Compos. Struct.*, vol. 184, pp. 1147–1155, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.10.061.
- [26] J. Fernández-Pérez, J. L. Cantero, J. Díaz-Álvarez, and M. H. Miguélez, "Influence of cutting parameters on tool wear and hole quality in composite aerospace components drilling," *Compos. Struct.*, vol. 178, pp. 157–161, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.06.043.
- [27] N. Feito, J. Díaz-Álvarez, J. López-Puente, and M. H. Miguelez, "Numerical analysis of the influence of tool wear and special cutting geometry when drilling woven CFRPs," *Compos. Struct.*, vol. 138, pp. 285–294, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.11.065.
- [28] N. Feito, A. Díaz-Álvarez, J. L. Cantero, M. Rodríguez-Millán, and H. Miguélez, "Experimental analysis of special tool geometries when drilling woven and multidirectional CFRPs," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 33–55, 2016, doi: 10.1177/0731684415612931.
- [29] J. Díaz-Álvarez, A. Olmedo, C. Santiuste, and M. H. Miguélez, "Theoretical estimation of thermal effects in drilling of woven carbon fiber composite," *Materials (Basel)*, vol. 7, no. 6, pp. 4442–4454, 2014, doi: 10.3390/ma7064442.
- [30] A. Díaz-Álvarez, M. Rodríguez-Millán, J. Díaz-Álvarez, and M. H. Miguélez, "Experimental analysis of drilling induced damage in aramid composites," *Compos. Struct.*, vol. 202, pp. 1136–1144, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.05.068.
- [31] Ş. Bayraktar and Y. Turgut, "Determination of delamination in drilling of carbon fiber reinforced carbon matrix composites/Al 6013-T651 stacks," *Measurement*, vol. 154, p. 107493, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107493>.
- [32] S. Chaitanya and I. Singh, "Ecofriendly treatment of aloe vera fibers for PLA based green composites," *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, 2018, doi: 10.1007/s40684-018-0015-8.
- [33] L. Á. De Oliveira, J. C. Dos Santos, T. H. Panzera, R. T. S. Freire, L. M. G. Vieira, and J. C. C. Rubio, "Investigations on short coir fibre-reinforced composites via full factorial design," *Polym. Polym. Compos.*, vol. 26, no. 7, pp. 391–399, 2018, doi: 10.1177/0967391118806144.
- [34] P. K. Bajpai, K. Debnath, and I. Singh, "Hole making in natural polylactic acid laminates : An

- experimental investigation," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 30, no. 1, pp. 1–17, 2015, doi: 10.1177/08927057155575094.
- [35] K. Debnath, M. Sisodia, A. Kumar, and I. Singh, "Damage-Free Hole Making in Fiber-Reinforced Composites: An Innovative Tool Design Approach," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, no. 10, pp. 1400–1408, 2016, doi: 10.1080/10426914.2016.1140191.
- [36] K. Debnath, I. Singh, and A. Dvivedi, "Drilling Characteristics of Sisal Fiber-Reinforced Epoxy and Polypropylene Composites," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 29, no. 11–12, pp. 1401–1409, 2014, doi: 10.1080/10426914.2014.941870.
- [37] K. Debnath, I. Singh, and A. Dvivedi, "On the analysis of force during secondary processing of natural fiber-reinforced composite laminates," *Polym. Compos.*, vol. 38, no. 1, pp. 164–174, 2017, doi: 10.1002/pc.23572.
- [38] V. Chaudhary and P. P. Gohil, "Investigations on Drilling of Bidirectional Cotton Polyester Composite," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, no. 7, pp. 960–968, 2016, doi: 10.1080/10426914.2015.1059444.
- [39] N. Venkateshwaran and A. ElayaPerumal, "Hole quality evaluation of natural fiber composite using image analysis technique," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 32, no. 16, pp. 1188–1197, 2013, doi: 10.1177/0731684413486847.
- [40] A. Athijayamani, M. Thiruchitrambalam, U. Natarajan, and B. Pazhanivel, "Influence of alkali-treated fibers on the mechanical properties and machinability of roselle and sisal fiber hybrid polyester composite," *Polym. Compos.*, vol. 31, no. 4, pp. 723–731, 2010, doi: 10.1002/pc.20853.
- [41] M. Ramesh, T. Sri Ananda Atreya, U. S. Aswin, H. Eashwar, and C. Deepa, "Processing and mechanical property evaluation of banana fiber reinforced polymer composites," *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 563–572, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.284.
- [42] S. O. Ismail, H. N. Dhakal, E. Dimla, J. Beaugrand, and I. Popov, "Effects of drilling parameters and aspect ratios on delamination and surface roughness of lignocellulosic HFRP composite laminates," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 133, no. 7, 2016, doi: 10.1002/app.42879.
- [43] N. Abilash and M. Sivapragash, "Optimizing the delamination failure in bamboo fiber reinforced polyester composite," *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 28, no. 1, pp. 92–102, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.09.004>.
- [44] S. A. S. Azuan, J. M. Juraidi, and W. M. W. Muhamad, "Evaluation of Delamination in Drilling Rice Husk Reinforced Polyester Composites," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 232, pp. 106–110, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.232.106.
- [45] A. Díaz-Álvarez, J. Díaz-Álvarez, C. Santiuste, and M. H. Miguélez, "Experimental and numerical analysis of the influence of drill point angle when drilling biocomposites," *Compos. Struct.*, vol. 209, pp. 700–709, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.11.018.
- [46] G. D. Babu, K. S. Babu, and B. U. M. Gowd, "Effects of drilling parameters on delamination of hemp fiber reinforced composites," *Int. J. Mech. Eng. Res. Dev.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2012.
- [47] S. A. S. Azuan, "Effects of Drilling Parameters on Delamination of Coconut Meat Husk Reinforced Polyester Composites," *Adv. Environ. Biol.*, vol. 7, no. 6, pp. 1097–1100, 2013, doi: 10.1007/978-3-642-38345-8_6.
- [48] M. Roy Choudhury, M. S. Srinivas, and K. Debnath, "Experimental investigations on drilling of lignocellulosic fiber reinforced composite laminates," *J. Manuf. Process.*, vol. 34, pp. 51–61, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.032>.
- [49] S. Aravindh and K. Umanath, "Delamination in drilling of natural Fibre Reinforced Polymer Composites produced by Compression moulding," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 767, pp. 796–800, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767.796.
- [50] V. Sridharan and N. Muthukrishnan, "Optimization of machinability of polyester/modified jute fabric composite using grey relational analysis (GRA)," *Procedia Eng.*, vol. 64, pp. 1003–1012, 2013, doi: 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*, pp.

- 10–14, 2016, doi: 10.1007/s13369-015-2005-2.
- [52] T. B. Yallem, P. Kumar, and I. Singh, "A study about hole making in woven jute fabric-reinforced polymer composites," *Proc IMechE Part L J Mater. Des. Appl.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–11, 2015, doi: 10.1177/1464420715587750.
- [53] S. N. Monteiro, L. A. H. Terrones, and J. R. M. D'Almeida, "Mechanical performance of coir fiber/polyester composites," *Polym. Test.*, vol. 27, no. 5, pp. 591–595, 2008, doi: 10.1016/j.polymertesting.2008.03.003.
- [54] S. Jayabal and U. Natarajan, "Drilling analysis of coir – fibre-reinforced polyester composites," *Bull. Mater. Sci.*, vol. 34, no. 7, pp. 1563–1567, 2011, doi: doi.org/10.1007/s12034-011-0359-y.
- [55] P. K. Bajpai and I. Singh, "Drilling behavior of sisal fiber-reinforced polypropylene composite laminates," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 32, no. 20, pp. 1569–1576, 2013, doi: 10.1177/0731684413492866.
- [56] L. M. P. Durão *et al.*, "Drilling delamination outcomes on glass and sisal reinforced plastics," *Mater. Sci. Forum*, vol. 730–732, pp. 301–306, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.301.
- [57] W.-C. Chen, "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 37, no. 8, pp. 1097–1108, 1997, doi: https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8.
- [58] G. Anand, N. Alagumurthi, K. Palanikumar, N. Venkateshwaran, and R. Elansezhain, "Influence of drilling process parameters on hybrid vinyl ester composite," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 33, no. 12, pp. 1299–1305, Sep. 2018, doi: 10.1080/10426914.2018.1453161.
- [59] D. Chandramohan and K. Marimuthu, "Drilling of Natural Fiber Particle Reinforced Polymer Composite Material," *Int. J. Adv. Eng. Res. Stud.*, vol. 1, no. 1, pp. 134–145, 2011.
- [60] S. Aravindh and K. Umanath, "Delamination in Drilling of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites Produced by Compression Moulding," in *Advances in Materials and Manufacturing*, 2015, vol. 766, pp. 796–800, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767.796.
- [61] J. L. Mercy, P. Sivashankari, M. Sangeetha, K. R. Kavitha, and S. Prakash, "Genetic Optimization of Machining Parameters Affecting Thrust Force during Drilling of Pineapple Fiber Composite Plates – an Experimental Approach," *J. Nat. Fibers*, pp. 1–12, Jul. 2020, doi: 10.1080/15440478.2020.1788484.
- [62] N. M, R. Upadhya, S. Sehgal, V. K. S, and B. H, "Mechanical and drilling process characterisation of herringbone sisal fabric reinforced vinyl ester sandwich composites," *Adv. Mater. Process. Technol.*, pp. 1–18, Dec. 2020, doi: 10.1080/2374068X.2020.1855963.
- [63] C. M. Machado, D. Silva, C. Vidal, B. Soares, and J. P. Teixeira, "A new approach to assess delamination in drilling carbon fibre-reinforced epoxy composite materials," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-06636-z.
- [64] J. P. Davim, J. C. Rubio, and A. M. Abrao, "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 9, pp. 1939–1945, 2007, doi: https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.10.009.
- [65] H. Rezghi Maleki, M. Hamed, M. Kubouchi, and Y. Arao, "Experimental study on drilling of jute fiber reinforced polymer composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 53, no. 3, pp. 283–295, 2019.
- [66] M. Ramesh, K. Palanikumar, and K. H. Reddy, "Experimental investigation and analysis of machining characteristics in drilling hybrid glass-sisal-jute fiber reinforced polymer composites," 2014.
- [67] R. Vinayagamoorthy, N. Rajeswari, and S. Karthikeyan, "Investigations of damages during drilling of natural sandwich composites," in *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 766, pp. 812–817.
- [68] R. Vinayagamoorthy, N. Rajeswari, S. Sivanarasimha, and K. Balasubramanian, "Fuzzy based optimization of thrust force and torque during drilling of natural hybrid composites," in *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 787, pp. 265–269.
- [69] B. V. Ramnath, S. Sharavanan, and J. Jeykrishnan, "Optimization of process parameters in drilling

- of fibre hybrid composite using Taguchi and grey relational analysis,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 183, no. 1, p. 12003.
- [70] R. Vinayagamoorthy, “Parametric optimization studies on drilling of sandwich composites using the Box–Behnken design,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 32, no. 6, pp. 645–653, 2017, doi: 10.1080/10426914.2016.1232811.
- [71] S. Pailoor, H. N. N. Murthy, and T. N. Sreenivasa, “Drilling of In-Line Compression Molded Jute / Polypropylene Composites,” *J. Nat. Fibers*, vol. 18, no. 1, pp. 91–104, 2021, doi: 10.1080/15440478.2019.1612309.
- [72] Y. H. Çelik and M. S. Alp, “Determination of Milling Performance of Jute and Flax Fiber Reinforced Composites,” *J. Nat. Fibers*, vol. 00, no. 00, pp. 1–15, 2020, doi: 10.1080/15440478.2020.1764435.
- [73] R. F. Gunst, “Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments,” *Technometrics*, vol. 38, no. 3, pp. 284–286, 1996, doi: 10.1080/00401706.1996.10484509.
- [74] Q. K. Beg, R. K. Saxena, and R. Gupta, “Kinetic constants determination for an alkaline protease from *Bacillus mojavensis* using response surface methodology,” *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 78, no. 3, pp. 289–295, May 2002, doi: <https://doi.org/10.1002/bit.10203>.
- [75] A. K. Sahoo and B. Sahoo, “Mathematical modelling and multi-response optimisation using response surface methodology and grey based Taguchi method: an experimental investigation,” *Int. J. Exp. Des. Process Optim.*, vol. 2, no. 3, pp. 221–242, Jan. 2011, doi: 10.1504/IJEDPO.2011.042745.
- [76] A. Majumder, “COMPARISON OF ANN WITH RSM IN PREDICTING SURFACE ROUGHNESS WITH RESPECT TO PROCESS PARAMETERS IN Nd: YAG LASER DRILLING,” *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 10, pp. 5175–5186, 2010.

Chapitre V

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

Chapitre V.

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

Contenu du chapitre	Page
Résumé.....	131
V.1 Introduction	132
V.2 Méthodes et techniques expérimentale.....	135
V.3 Résultats et discussion	135
V.3.1 Prédiction du facteur de délamination par le modèle ANN	135
V.3.2 Comparaison des modèles RSM et ANN	143
V.4 Conclusion.....	145
V.5 Références.....	147

Chapitre V :

Comportement en perçage d'une structure biosandwiche : optimisation par ANN

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, l'utilisation de fibres végétales comme renfort de matériaux composites a constitué un véritable défi pour l'industrie ainsi que pour les chercheurs scientifiques d'un point de vue économique et écologique [1], [2]. Ceci est dû au potentiel des fibres végétales en termes de propriétés mécaniques qui peuvent concurrencer avec d'autres types de fibres telles que les fibres de verre synthétiques couramment utilisées dans l'industrie [3]–[5]. En effet, grâce à leur faible impact environnemental et à leur recyclabilité (écologique) ; les composites renforcés par des fibres végétales, appelés biocomposites sont principalement utilisés dans le domaine de la construction de matériel dédié au secteur de sport, de transport, etc [6], [7]. En revanche, les procédés de fabrication de ces derniers sont mal maîtrisés en raison de l'état naturel des fibres végétales. Ceci, a nécessité des études scientifiques approfondies sur le comportement des biocomposites afin de mieux comprendre le comportement de ces produits [8].

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 [9] telles que : sisal [10]–[12], Phoenix dactylifera [13] jute [12], [14]–[16], Agave americana [17], [18] flax [7], [12], [15], [19], Rhoctophyllum camerunense [20] et l'arche d'acacia nilotica L. [21].

La particularité des caractéristiques intrinsèques des matériaux composites est l'anisotropie, l'hétérogénéité ainsi que le très fort contraste des propriétés mécaniques entre les fibres-matrice qui est à l'origine de divers défauts lors de l'usinage, notamment le délaminage, la fissuration, les fibres non coupées et l'arrachement des fibres qui conduit à des surfaces rugueuses [22]. Actuellement, de nombreux travaux scientifiques sont disponibles sur l'usinage lors du perçage des renforts composites en fibres synthétiques telles que : les fibres de verre, de carbone et d'aramide [23][24][25][26][27][28][29][30][31]. Malheureusement, peu d'articles traitent l'étude du perçage des biocomposites [16][24][32][33][34][35][36][37][38][39][40][41][42][44][45][46][47][48][49][50][51][52][53][54]. 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. En effet, une étude complète récente de Geng et al. [22] a résumé les recherches précédentes disponibles dans la littérature sur la formation de délamination des composites. Selon plusieurs auteurs [16][22], l'analyse statistique de la variance est souvent adoptée afin de déterminer les facteurs les plus influents sur les paramètres de sortie et la présence, ou non, d'interactions entre les paramètres. Un modèle de prédiction est ensuite mis en œuvre par la méthode de régression linéaire ou par d'autres modèles tels que RSM ou ANN. Dans la littérature, plusieurs théories et

méthodes ont été proposées pour déterminer le facteur de délamination dans le cas du perçage [16][31][55]. La méthode la plus utilisée est le rapport entre le diamètre réel du trou (D_{max}) souvent observé au microscope optique et le diamètre (D) du foret utilisé.

Les forets les plus couramment utilisés sont des forets hélicoïdaux standard en acier rapide (HSS) [35][39][40][46][52][53][56] ou en carbure de tungstène (WC) [53]. L'angle de la pointe du foret est généralement de 118° . Il existe également d'autres types d'outils testés pour le perçage des biocomposites, tels que le foret Brad en carbure de tungstène [57] ou un foret HSS à 2 arêtes de coupe [40]. Les diamètres des outils varient de 3 à 14 mm.

Bajpai et al. [41] ont étudié expérimentalement le comportement de perçage des composites verts biodégradables renforcés de fibres végétales et d'acide polylactique (PLA) tels que le sisal/PLA et le *Grewia optiva*/PLA. L'étude a traité l'effet des paramètres de coupe et de la géométrie du foret en termes de force de poussée et de couple de perçage et de dommages induits par le perçage en utilisant la technique RSM. Les résultats montrent que la géométrie des forets affecte significativement les deux types de biocomposites étudiés. Un autre travail présenté par Bajpai et Singh [40], qui consiste à étudier les performances de perçage du biocomposite sisal/polypropylène en utilisant des géométries d'outils, à savoir : le trépan hélicoïdal et la trépanation de l'outil. Les paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance et géométrie de l'outil) ont été analysés à l'aide de la technique ANOVA. Venkateshwaran et Perumal [46] ont étudié la délamination en sortie d'un biocomposite vert (fibre de banane courte / époxy) en faisant varier la vitesse de coupe et la vitesse d'avance à l'aide d'un foret HSS de 10 mm de diamètre. Les résultats obtenus ont été analysés à l'aide de l'analyse ANOVA tandis que l'analyse de la délamination a été effectuée par ultrasons C-scan. En outre, Chaudhary et Gohil [45] ont étudié le comportement de perçage (tel que la force de poussée, le couple et le facteur de délamination de sortie) des laminés biocomposites bidirectionnels en fibre de polyester et de coton en fonction de la variation des paramètres de coupe. Les expériences ont été réalisées par la méthode orthogonale L_{27} de Taguchi. Athijayamani et al. [47] ont étudié les performances du comportement mécanique et l'usinabilité de biocomposites hybrides (sisal/roselle/polyester) à fibres courtes traitées avec 10% de NaOH pendant différentes durées. Les auteurs ont conclu que le biocomposite hybride produit à 30% en poids de fibres traitées pendant 8 h présente une meilleure stabilité dimensionnelle. Abilash et Sivapragash [50] ont utilisé trois outils de coupe de diamètres différents sur des stratifiés composites en polyester renforcés par des fibres naturelles de bambou traitées par des paramètres de coupe variables afin d'étudier le comportement de perçage en choisissant la méthode Taguchi selon le L_{18} . En outre, une analyse statistique de la variance

(ANOVA) a été adoptée pour voir quels paramètres de perçage sont statistiquement significatifs. Les valeurs minimales de délaminage en sortie ainsi obtenues correspondent à des paramètres de perçage plus faibles. Dans un travail similaire, Ismail et al [49] ont étudié l'effet des paramètres de coupe expérimentaux en utilisant la méthode Taguchi et le réseau orthogonal L16. L'étude a été réalisée sur le délaminage par perçage de trous dans des stratifiés biocomposites en fibres naturelles de chanvre. Ils ont conclu que les résultats obtenus sont optimaux pour une vitesse de coupe et une vitesse d'avance plus faibles pour la délamination et la rugosité de surface. Une autre étude comparative [57] entre un composite époxy/verre et époxy/sisal a été menée pour étudier l'effet de la géométrie de l'outil. L'opération de perçage a été réalisée avec deux forets différents en carbure de tungstène de 6 mm de diamètre ; l'un des outils est un foret hélicoïdal standard et l'autre est de type Brad. Récemment, Belaadi et al. [16] ont développé une recherche intéressante axée sur l'effet des paramètres de perçage tels que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et les diamètres des forets sur les biocomposites fibres courtes de jute/polyester afin d'estimer l'influence du facteur de délamination F_d .

V.2 Méthodes et techniques expérimentale

Cette section du chapitre a été décrite en détail dans le chapitre précédant (Chapitre IV).

V.3 Résultats et discussion

V.3.1 Prédiction du facteur de délamination par le modèle ANN

Les données (Tableau V-1) ont été intégrées dans le modèle de réseau par la couche d'entrée et la réponse par la couche de sortie. Un perceptron multicouche composé d'une couche d'entrée, d'une couche cachée et d'une couche de sortie a été utilisé pour la prédiction du facteur de délamination. L'architecture du réseau ANN a été conçue à l'aide de la boîte à outils pour réseaux neuronaux de MATLAB. La modélisation par les réseaux de neurones constitue une approche puissante, permettant de reproduire le comportement de tout processus non linéaire, tel qu'il soit. Pour les forêts HSS-TiN et BSD, trois neurones dans la couche d'entrée, les couches cachées contiennent respectivement dix et douze neurones, et un neurone pour la couche de sortie (Figure V-1). La détermination du nombre de neurones dans les couches cachées repose sur la réduction de l'erreur lorsque le nombre de nœuds cachés augmente.

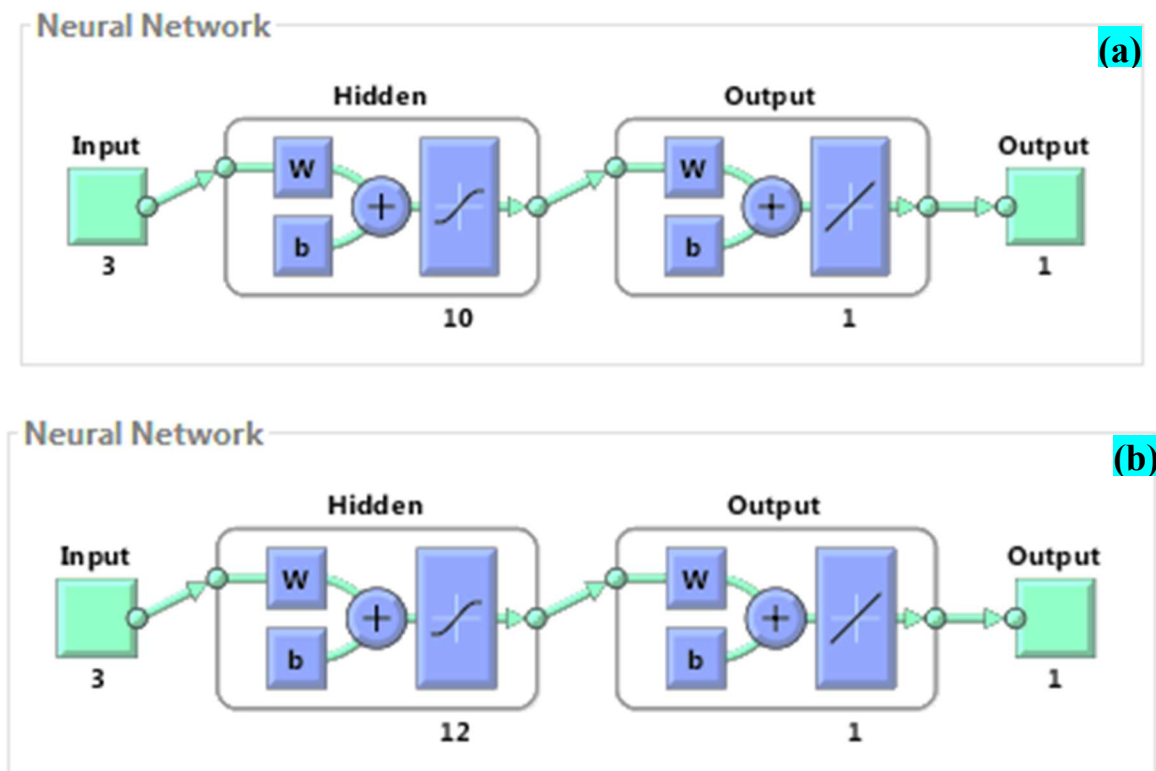


Figure V-1 Architecture ANN utilisée pour (a) l'outil HSS-TiN et (b) l'outil BSD.

Tableau V-1 montre les architectures ANN testées et les valeurs MSE et R pour la formation, la validation et le test des données F_d pour les outils de perçage HSS-TiN et BSD. Ces neurones sont reliés entre eux au moyen de poids.

Tableau V-1 Résultats expérimentaux pour le facteur de délamination des trous percés à la sortie.

Numéro de test	Variables d'entrée			Variables de sortie					
	f (mm/min)	N (tr/min)	d (mm)	$F_{d(\text{HSS-TiN})}$			$F_{d(\text{BSD})}$		
				EXP	RSM	ANN	EXP	RSM	ANN
1	50	355	5	1,084	1,087	1,121	1,132	1,154	1,097
2	108	355	5	1,176	1,152	1,190	1,194	1,287	1,211
3	190	355	5	1,312	1,309	1,299	1,485	1,468	1,433
4	50	710	5	1,025	1,107	1,053	1,113	1,051	1,053
5	108	710	5	1,218	1,173	1,229	1,221	1,193	1,166
6	190	710	5	1,334	1,333	1,334	1,358	1,387	1,351
7	50	1400	5	1,045	1,092	1,029	1,117	1,034	1,094
8	108	1400	5	1,201	1,163	1,221	1,141	1,195	1,328
9	190	1400	5	1,355	1,328	1,344	1,423	1,416	1,640
10	50	355	7	1,127	1,086	1,113	1,306	1,280	1,147
11	108	355	7	1,181	1,168	1,193	1,413	1,412	1,361
12	190	355	7	1,321	1,350	1,313	1,678	1,591	1,573
13	50	710	7	1,117	1,109	1,101	1,121	1,194	1,143
14	108	710	7	1,217	1,193	1,274	1,429	1,335	1,392
15	190	710	7	1,320	1,377	1,319	1,479	1,528	1,498
16	50	1400	7	1,119	1,100	1,108	1,102	1,211	1,065
17	108	1400	7	1,246	1,188	1,248	1,387	1,370	1,347
18	190	1400	7	1,302	1,378	1,319	1,594	1,589	1,634
19	50	355	10	1,136	1,161	1,134	1,199	1,256	1,241
20	108	355	10	1,206	1,270	1,219	1,431	1,386	1,361
21	190	355	10	1,464	1,488	1,419	1,559	1,563	1,595
22	50	710	10	1,298	1,188	1,241	1,277	1,196	1,225
23	108	710	10	1,279	1,298	1,276	1,301	1,335	1,339
24	190	710	10	1,481	1,520	1,487	1,443	1,525	1,603
25	50	1400	10	1,171	1,188	1,194	1,272	1,263	1,199
26	108	1400	10	1,275	1,302	1,200	1,414	1,420	1,366
27	190	1400	10	1,555	1,529	1,546	1,684	1,637	1,577

Tableau V-2 Architectures ANN et MSE et valeurs de R pour la formation, la validation et les tests pour les outils HSS-TiN et BSD.

Modèle	Structure du réseau	Pourcentage	Échantillons	RMSE	Valeur de R	
F_d (HSS-TiN)	3-10-1	Formation	85	22	1,55738E-4	9,95854E-4
		Validation	5	1	7,09654E-5	0,00000E-0
		Test	15	4	3,34586E-4	9,99250E-4
F_d (BSD)	3-12-1	Formation	70	19	4,89445E-3	9,33291E-1
		Validation	4	4	2,14720E-2	8,00842E-1
		Test	4	4	4,26253E-3	9,90948E-1

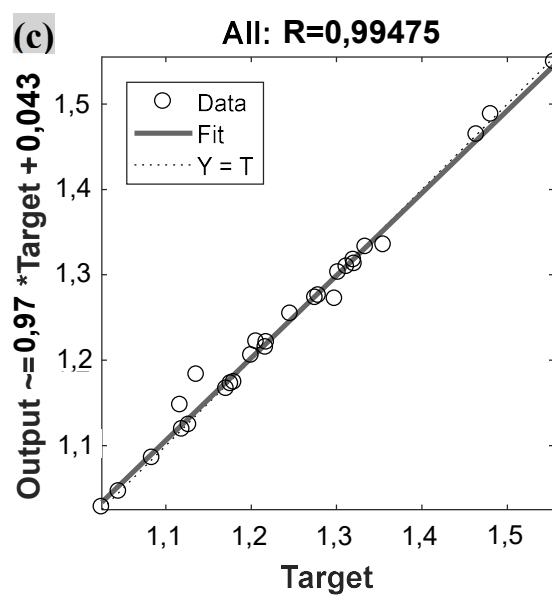
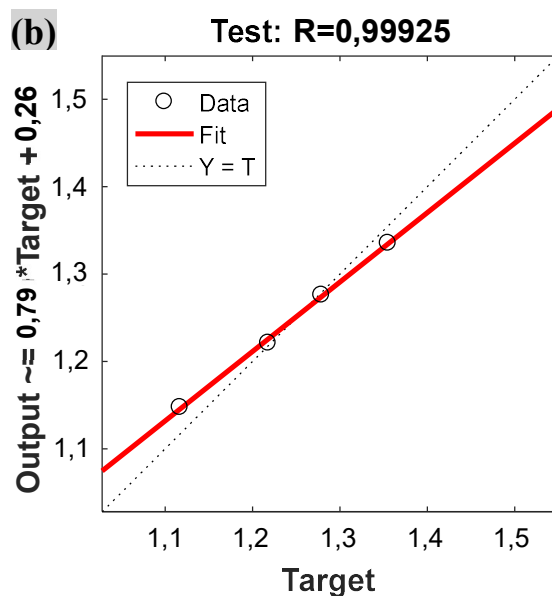
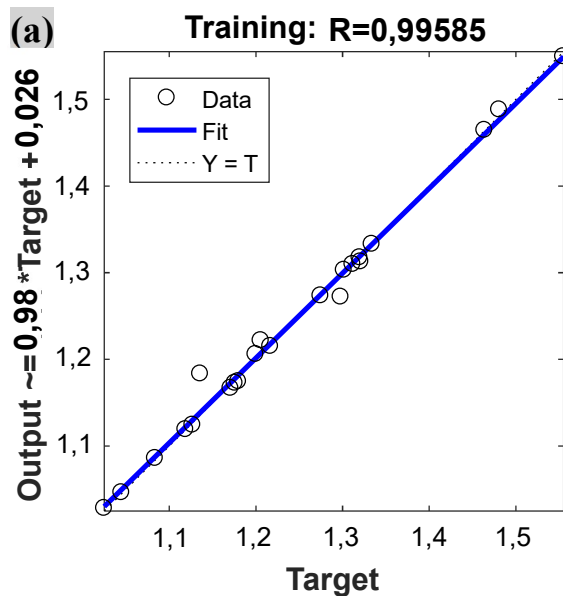
Tableau V-3 Modèle mathématique pour F_d (HSS-TiN) du perçage de la structure biosandwiche tissu de jute-liège/époxy obtenus par la méthode ANN.

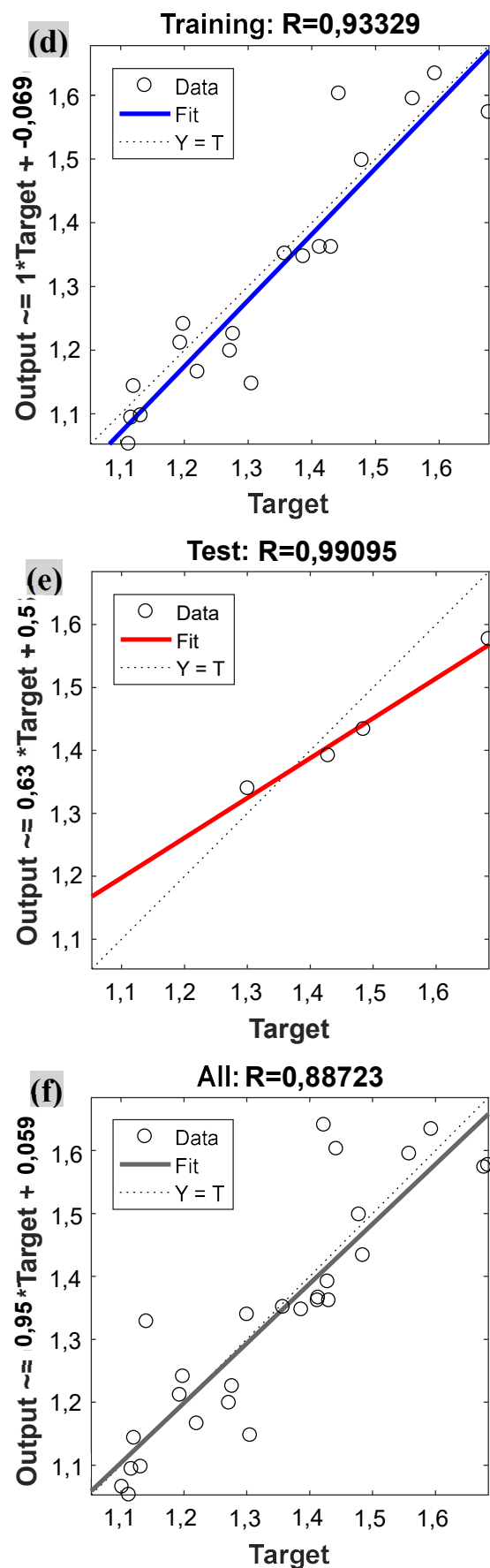
Réponse de l'ANN	Géométrie du foret
	HSS-TiN
F_d	$1,1311 + 0,0657 \times H_1 - 0,3190 \times H_2 - 0,0701 \times H_3 - 0,1217 \times H_4 - 0,1666 \times H_5 - 0,0713 \times H_6 + 0,0514 \times H_7 + 0,0852 \times H_8 + 0,0594 \times H_9 + 0,0596 \times H_{10}$ $\left\{ \begin{array}{l} H_1 = \tanh(0,5 \times (-0,0014 \times f + 0,0028 \times N + 0,4176 \times d - 5,7214)) \\ H_2 = \tanh(0,5 \times (-0,0058 \times f - 0,0001 \times N + 0,1945 \times d - 2,0769)) \\ H_3 = \tanh(0,5 \times (0,0307 \times f - 0,0011 \times N - 0,5380 \times d + 0,0155)) \\ H_4 = \tanh(0,5 \times (-0,0115 \times f + 0,0011 \times N - 0,5036 \times d + 5,5530)) \\ H_5 = \tanh(0,5 \times (-0,0160 \times f + 0,0010 \times N + 0,15627 \times d + 0,3691)) \\ H_6 = \tanh(0,5 \times (-0,0277 \times f - 0,0018 \times N + 0,1578 \times d + 4,2872)) \\ H_7 = \tanh(0,5 \times (-0,0205 \times f + 0,0026 \times N - 0,7482 \times d + 7,7941)) \\ H_8 = \tanh(0,5 \times (0,0088 \times f - 0,0023 \times N + 0,2148 \times d + 0,4729)) \\ H_9 = \tanh(0,5 \times (-0,0145 \times f + 0,0005 \times N + 0,6481 \times d - 4,9045)) \\ H_{10} = \tanh(0,5 \times (0,0002 \times f + 0,0003 \times N + 0,4914 \times d - 4,5155)) \end{array} \right.$

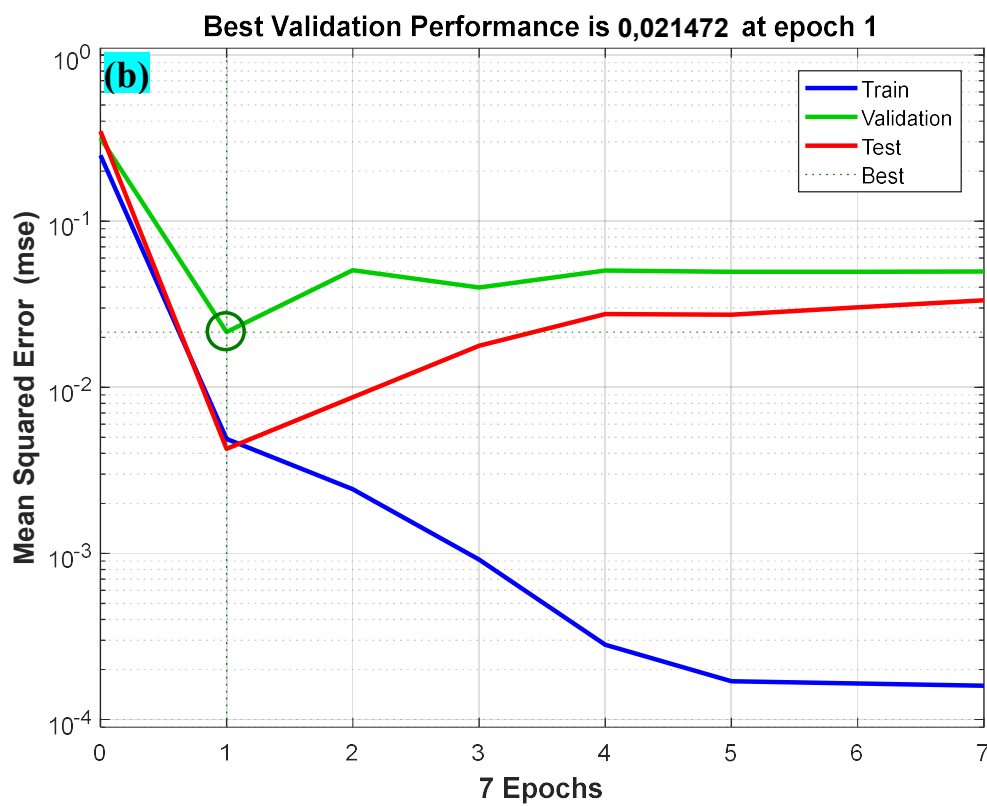
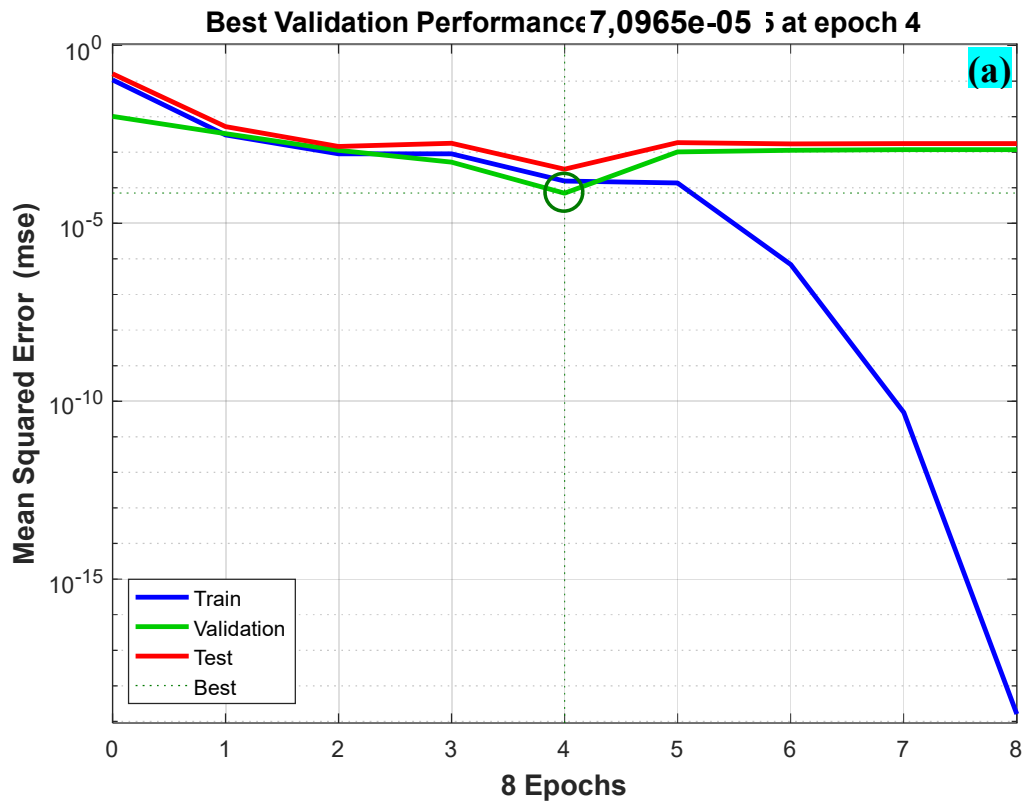
Tableau V-4 Modèle mathématique pour F_d (BSD) du perçage de la structure biosandwich tissu de jute-liège/époxy obtenus par la méthode ANN.

Réponse de l'ANN	Géométrie du foret BSD
F_d	$1,3203 - 1,630 \times H_1 + 1,4059 \times H_2 + 0,4465 \times H_3 + 0,9034 \times H_4 + 0,0229 \times H_5 - 0,8512 \times H_6 + 0,0710 \times H_7 - 0,6178 \times H_8 + 0,20575 \times H_9 + 0,6614 \times H_{10} + 0,9535 \times H_{11} + 0,4120 \times H_{12}$ $\left\{ \begin{array}{l} H_1 = \tanh(0,5 \times (0,2113 - 0,0010 \times f + -0,0000 \times N - 0,01422 \times d)) \\ H_2 = \tanh(0,5 \times (-0,1455 + 0,0008 \times f + -0,0000 \times N + 0,0080 \times d)) \\ H_3 = \tanh(0,5 \times (-0,0393 + 0,0002 \times f - 0,0000 \times N + 0,0024 \times d)) \\ H_4 = \tanh(0,5 \times (-0,0819 + 0,0005 \times f - 0,0000 \times N + 0,0038 \times d)) \\ H_5 = \tanh(0,5 \times (-0,0004 + 0,0000 \times f - 0,0000 \times N - 0,0002 \times d)) \\ H_6 = \tanh(0,5 \times (0,0587 - 0,0004 \times f + 0,0000 \times N - 0,0021 \times d)) \\ H_7 = \tanh(0,5 \times (-0,0033 + 0,0000 \times f + 0,0000 \times N - 0,0003 \times d)) \\ H_8 = \tanh(0,5 \times (0,0538 - 0,0003 \times f + 0,0000 \times N - 0,0031 \times d)) \\ H_9 = \tanh(0,5 \times (-0,0153 + 0,0001 \times f + 0,0000 \times N + 0,0005 \times d)) \\ H_{10} = \tanh(0,5 \times (-0,0554 + 0,0003 \times f - 0,0000 \times N + 0,0022 \times d)) \\ H_{11} = \tanh(0,5 \times (-0,0851 + 0,0005 \times f - 0,0000 \times N + 0,0042 \times d)) \\ H_{12} = \tanh(0,5 \times (-0,0344 + 0,0002 \times f - 0,0000 \times N + 0,0015 \times d)) \end{array} \right.$

Dans les Figures V-2a-c et d-f, la prédiction par réseau neuronal de la délamination F_d et les résultats des essais expérimentaux pour les outils HSS-TiN et BSD, respectivement, sont comparés pour les ensembles de données de formation, d'essai et de validation. Il ressort de la Figure V-3 et de la Figure V-4 que la prédiction ANN correspond parfaitement aux résultats expérimentaux. Les modèles ANN ainsi développés pour HSS-TiN et BSD (Tableau V-2) ont la capacité de bien interpréter les données et peuvent servir d'outil de prédiction efficace pour le facteur de délamination. En outre, les résultats montrent que le modèle est un moyen efficace et applicable pour mesurer le facteur de délamination des biosandwiches fabriqués à partir de tissu de jute.



Figure V-2 Schéma de validation de régression des données F_d (a-c) outils HSS-TiN et (e-f) BSD.



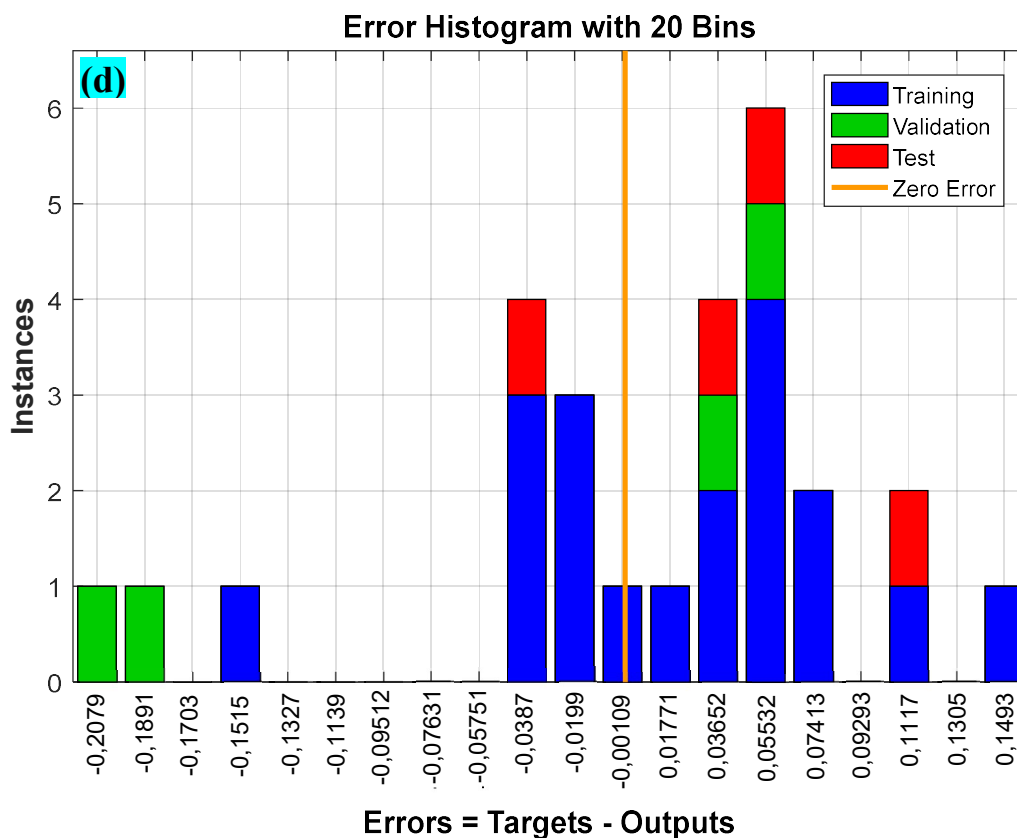
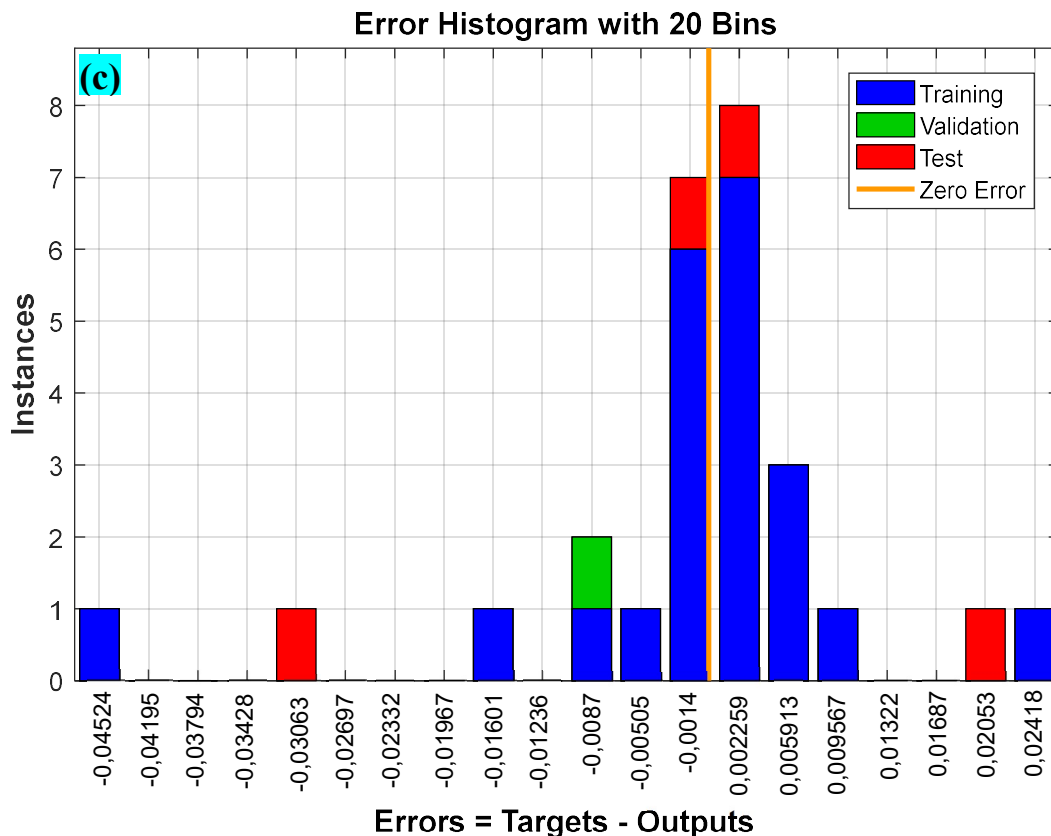
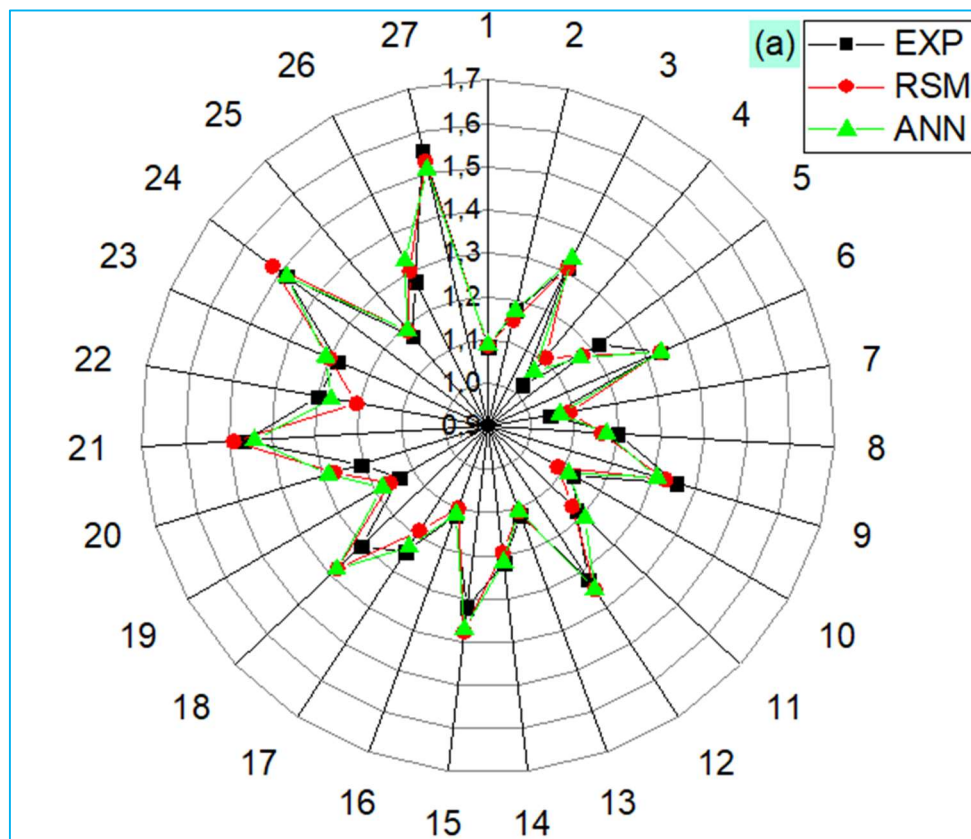


Figure V-3 Résultats de la validation ANN (a,c) pour les outils HSS-TiN et (b,d) pour les outils BSD.

V.3.2 Comparaison des modèles RSM et ANN

Une comparaison des résultats prédits par les modèles ANN et RSM avec ceux obtenus expérimentalement est présentée dans la Figure V-4. Il a été constaté que les deux modèles décrivent de manière satisfaisante les résultats obtenus expérimentalement. Le pourcentage d'erreur absolu maximum dans la prédiction des facteurs de délamination des outils HSS-TiN et BSD par le modèle ANN est de 4,16% et 6,28%, respectivement, alors que dans le modèle RSM, ce pourcentage est de 6,93% et 7,78% (Figure V-5). Ainsi, le modèle ANN fournit une prédiction plus précise que le modèle RSM. Dans la mesure où ces taux d'erreur sont faibles, nous pouvons dire que le processus d'optimisation est approprié et que le modèle fournit une prédiction de réponse avec une grande précision.



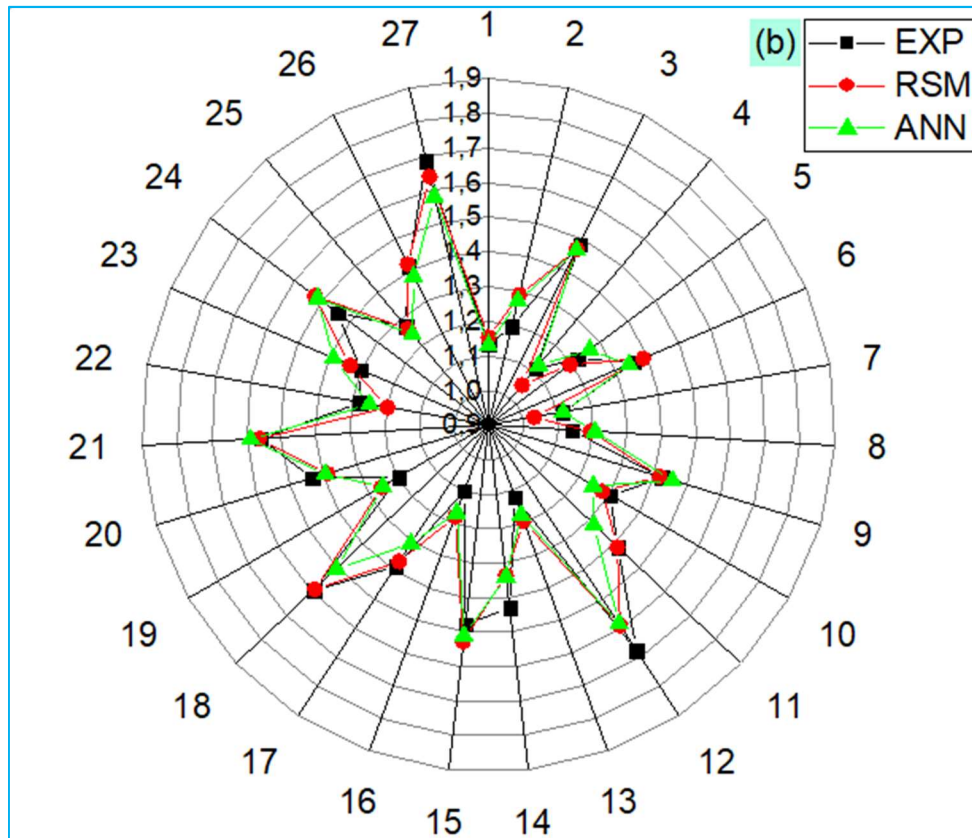
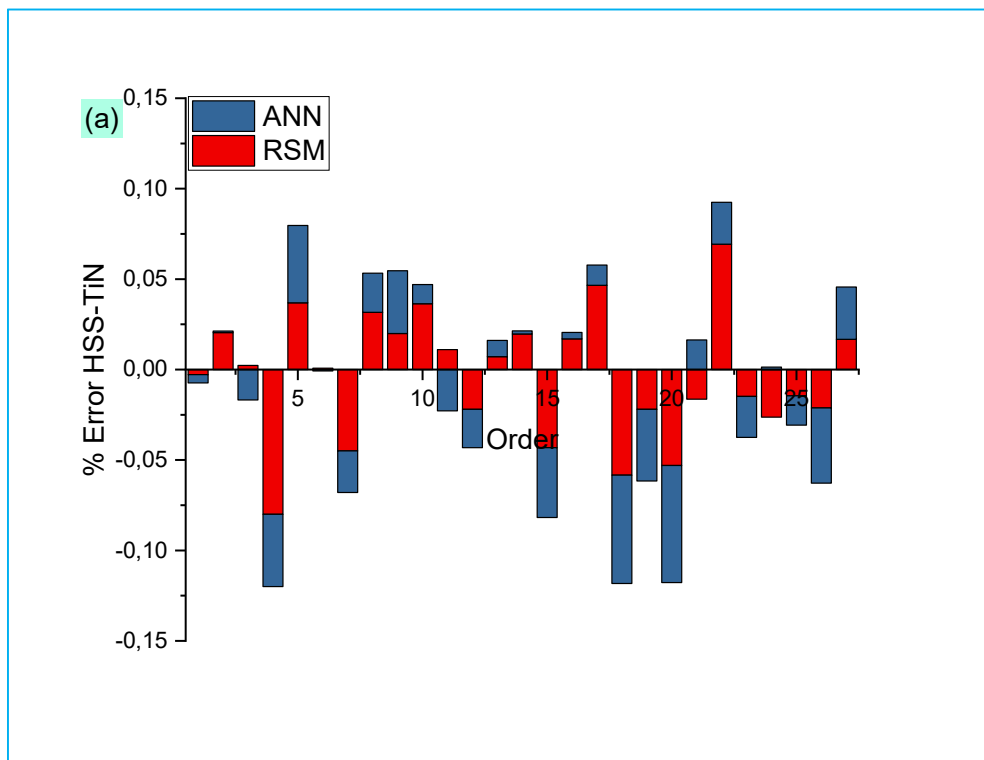


Figure V-4 Comparaison entre F_d expérimental et prédit avec les modèles RSM et ANN
 (a) forets HSS-TiN et (b) BSD.



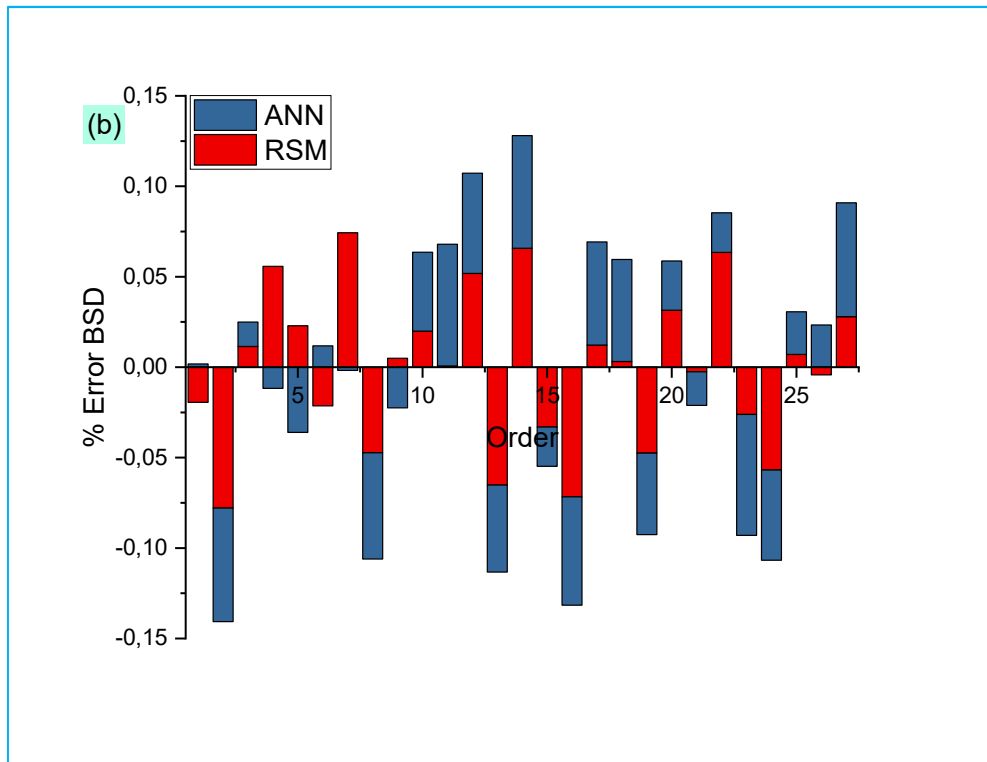


Figure V-5 F_d résiduels pour RSM et ANN (a) forets HSS-TiN et (b) BSD.

V.4 Conclusion

La présente recherche s'est concentrée sur le développement et l'optimisation des facteurs de délamination des composites polymères à fibres de jute avec deux types de forets HSS-TiN et BSD. Les résultats obtenus ci-dessus ont montré les conclusions suivantes :

- Sur la base des effets de la combinaison des paramètres de coupe dans le processus de perçage, une combinaison d'une faible vitesse d'avance et d'un petit diamètre d'outil est clairement nécessaire pour minimiser le facteur de délamination.
- L'importance du matériau et de la vitesse d'avance par rapport au diamètre du foret sont prédominants sur le facteur de délamination, et il a été remarqué que la vitesse de coupe n'a aucune influence sur ce dernier. La contribution des différents éléments de la condition optimale de perçage est la suivante : vitesse d'avance (66,04%), diamètre du foret (10,54%) et vitesse de coupe.
- La qualité de l'optimisation est considérée comme bonne avec un facteur de désirabilité global de 97%.
- Les résultats des modèles prédictifs et les mesures expérimentales sont en bon accord.
- Les pourcentages d'erreur moyens entre le modèle et les résultats expérimentaux sont de 0,26% pour le foret HSS-TiN et de 1,01% pour le foret BSD.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les 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. Nous avons présenté une étude sur l'algorithme du rétro propagation qui a prouvé son efficacité dans la pratique avec ses capacités d'apprentissage et d'identification.

V.5 Références

- [1] C. Baley, A. Le Duigou, A. Bourmaud, and P. Davies, "Influence of drying on the mechanical behaviour of flax fibres and their unidirectional composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 1226–1233, 2012, doi: 10.1016/j.compositesa.2012.03.005.
- [2] A. Le Duigou and C. Baley, "Coupled micromechanical analysis and life cycle assessment as an integrated tool for natural fibre composites development," *J. Clean. Prod.*, vol. 83, pp. 61–69, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.07.027.
- [3] E. Diabor, P. Funkenbusch, and E. E. Kaufmann, "Characterization of Cassava Fiber of Different Genotypes as a Potential Reinforcement Biomaterial for Possible Tissue Engineering Composite Scaffold Application," *Fibers Polym.*, vol. 20, no. 2, pp. 217–228, 2019, doi: 10.1007/s12221-019-8702-9.
- [4] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, 2012, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.
- [5] S. Amroune, A. Belaadi, M. Bourchak, A. Makhlof, and H. Satha, "Statistical and Experimental Analysis of The Mechanical Properties of Flax Fibers," *J. Nat. Fibers*, doi: 10.1080/15440478.2020.1775751.
- [6] A. Belaadi, M. Bourchak, and H. Aouici, "Mechanical properties of vegetal yarn: Statistical approach," *Compos. Part B Eng.*, vol. 106, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.09.033.
- [7] A. Belaadi, S. Amroune, and M. Bourchak, "Effect of eco-friendly chemical sodium bicarbonate treatment on the mechanical properties of flax fibres: Weibull statistics," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Jan. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04628-8.
- [8] Y. Zhou, M. Fan, and L. Chen, *Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview*, vol. 101. Elsevier Ltd, 2016.
- [9] S. Dutta, N. K. Kim, R. Das, and D. Bhattacharyya, "Effects of sample orientation on the fire reaction properties of natural fibre composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 157, pp. 195–206, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.08.118.
- [10] A. Belaadi, A. Bezazi, M. Maache, and F. Scarpa, "Fatigue in sisal fiber reinforced polyester composites: Hysteresis and energy dissipation," *Procedia Eng.*, vol. 74, pp. 325–328, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.06.272.
- [11] A. Belaadi, A. Bezazi, M. Bourchak, and F. Scarpa, "Tensile static and fatigue behaviour of sisal fibres," *Mater. Des.*, vol. 46, pp. 76–83, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.09.048.
- [12] M. Cherief, A. Belaadi, M. Bouakba, M. Bourchak, and I. Meddour, "Behaviour of lignocellulosic fibre-reinforced cellular core under low-velocity impact loading: Taguchi method," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05393-9.
- [13] S. Amroune *et al.*, "Tensile mechanical properties and surface chemical sensitivity of technical fibres from date palm fruit branches (*Phoenix dactylifera* L.)," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 71, 2015, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.12.011.
- [14] Y. Dobah, M. Bourchak, A. Bezazi, A. Belaadi, and F. Scarpa, "Multi-axial mechanical characterization of jute fiber/polyester composite materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 90, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.10.030.
- [15] M. Boumaaza, A. Belaadi, and M. Bourchak, "The Effect of Alkaline Treatment on Mechanical Performance of Natural Fibers-reinforced Plaster: Optimization Using RSM," *J. Nat. Fibers*, 2020, doi: 10.1080/15440478.2020.1724236.
- [16] A. Belaadi, H. Laouici, and M. Bourchak, "Mechanical and drilling performance of short jute fibre-reinforced polymer biocomposites: statistical approach," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 106, no. 5, pp. 1989–2006, 2020, doi: 10.1007/s00170-019-04761-4.
- [17] A. Bezazi, A. Belaadi, M. Bourchak, F. Scarpa, and K. Boba, "Novel extraction techniques, chemical and mechanical characterisation of *Agave americana* L. natural fibres," *Compos. Part B Eng.*, vol.

- 66, pp. 194–203, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.05.014.
- [18] M. Jaouadi, S. M'sahli, and F. Sakli, "Optimization and Characterization of Pulp Extracted from the Agave Americana L. Fibers," *Text. Res. J.*, vol. 79, no. 2, pp. 110–120, 2009, doi: 10.1177/0040517508090781.
- [19] M. B. Bedjaoui A, Belaadi A, Amroune A, "Impact of surface treatment of flax fibers on tensile mechanical properties accompanied by a statistical study," 2019, doi: <https://doi.org/10.30880/ijie.00.00.0000.00.0000>.
- [20] A. Béakou, R. Ntenga, J. Lepetit, J. A. Atéba, and L. O. Ayina, "Physico-chemical and microstructural characterization of 'Rhectophyllum camerunense' plant fiber," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 1, pp. 67–74, 2008, doi: 10.1016/j.compositesa.2007.09.002.
- [21] R. Kumar *et al.*, "Characterization of New Cellulosic Fiber from the Bark of Acacia nilotica L. Plant," *J. Nat. Fibers*, vol. 00, no. 00, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1080/15440478.2020.1738305.
- [22] D. Geng *et al.*, "Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review," *Compos. Struct.*, vol. 216, pp. 168–186, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.099>.
- [23] H. Zhang, P. Zhu, Z. Liu, S. Qi, and Y. Zhu, "Research on prediction method of mechanical properties of open-hole laminated plain woven CFRP composites considering drilling-induced delamination damage," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–16, 2020, doi: 10.1080/15376494.2020.1745969.
- [24] S. Chaitanya and I. Singh, "Ecofriendly treatment of aloe vera fibers for PLA based green composites," *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 143–150, Jan. 2018, doi: 10.1007/s40684-018-0015-8.
- [25] N. Feito, J. Díaz-Álvarez, J. López-Puente, and M. H. Miguelez, "Experimental and numerical analysis of step drill bit performance when drilling woven CFRPs," *Compos. Struct.*, vol. 184, pp. 1147–1155, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.10.061.
- [26] J. Fernández-Pérez, J. L. Cantero, J. Díaz-Álvarez, and M. H. Miguélez, "Influence of cutting parameters on tool wear and hole quality in composite aerospace components drilling," *Compos. Struct.*, vol. 178, pp. 157–161, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.06.043.
- [27] N. Feito, J. Diaz-Álvarez, J. López-Puente, and M. H. Miguelez, "Numerical analysis of the influence of tool wear and special cutting geometry when drilling woven CFRPs," *Compos. Struct.*, vol. 138, pp. 285–294, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.11.065.
- [28] N. Feito, A. Diaz-Álvarez, J. L. Cantero, M. Rodríguez-Millán, and H. Miguélez, "Experimental analysis of special tool geometries when drilling woven and multidirectional CFRPs," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 33–55, 2016, doi: 10.1177/0731684415612931.
- [29] J. Díaz-Álvarez, A. Olmedo, C. Santiuste, and M. H. Miguélez, "Theoretical estimation of thermal effects in drilling of woven carbon fiber composite," *Materials (Basel)*, vol. 7, no. 6, pp. 4442–4454, 2014, doi: 10.3390/ma7064442.
- [30] A. Díaz-Álvarez, M. Rodríguez-Millán, J. Díaz-Álvarez, and M. H. Miguélez, "Experimental analysis of drilling induced damage in aramid composites," *Compos. Struct.*, vol. 202, pp. 1136–1144, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.05.068.
- [31] Ş. Bayraktar and Y. Turgut, "Determination of delamination in drilling of carbon fiber reinforced carbon matrix composites/Al 6013-T651 stacks," *Measurement*, vol. 154, p. 107493, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107493>.
- [32] L. Á. De Oliveira, J. C. Dos Santos, T. H. Panzera, R. T. S. Freire, L. M. G. Vieira, and J. C. C. Rubio, "Investigations on short coir fibre-reinforced composites via full factorial design," *Polym. Polym. Compos.*, vol. 26, no. 7, pp. 391–399, 2018, doi: 10.1177/0967391118806144.
- [33] S. A. S. Azuan, J. M. Juraidi, and W. M. W. Muhamad, "Evaluation of Delamination in Drilling Rice Husk Reinforced Polyester Composites," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 232, pp. 106–110, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.232.106.
- [34] S. Aravindh and K. Umanath, "Delamination in drilling of natural Fibre Reinforced Polymer Composites produced by Compression moulding," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 767, pp. 796–800,

- 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767.796.
- [35] V. Sridharan and N. Muthukrishnan, "Optimization of machinability of polyester/modified jute fabric composite using grey relational analysis (GRA)," *Procedia Eng.*, vol. 64, pp. 1003–1012, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.09.177.
- [36] 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*, pp. 10–14, 2016, doi: 10.1007/s13369-015-2005-2.
- [37] T. B. Yallem, P. Kumar, and I. Singh, "A study about hole making in woven jute fabric-reinforced polymer composites," *Proc IMechE Part L J Mater. Des. Appl.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–11, 2015, doi: 10.1177/1464420715587750.
- [38] S. N. Monteiro, L. A. H. Terrones, and J. R. M. D'Almeida, "Mechanical performance of coir fiber/polyester composites," *Polym. Test.*, vol. 27, no. 5, pp. 591–595, 2008, doi: 10.1016/j.polymertesting.2008.03.003.
- [39] S. Jayabal and U. Natarajan, "Drilling analysis of coir – fibre-reinforced polyester composites," *Bull. Mater. Sci.*, vol. 34, no. 7, pp. 1563–1567, 2011, doi: doi.org/10.1007/s12034-011-0359-y.
- [40] P. K. Bajpai and I. Singh, "Drilling behavior of sisal fiber-reinforced polypropylene composite laminates," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 32, no. 20, pp. 1569–1576, 2013, doi: 10.1177/0731684413492866.
- [41] P. K. Bajpai, K. Debnath, and I. Singh, "Hole making in natural polylactic acid laminates : An experimental investigation," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 30, no. 1, pp. 1–17, 2015, doi: 10.1177/0892705715575094.
- [42] K. Debnath, M. Sisodia, A. Kumar, and I. Singh, "Damage-Free Hole Making in Fiber-Reinforced Composites: An Innovative Tool Design Approach," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, no. 10, pp. 1400–1408, 2016, doi: 10.1080/10426914.2016.1140191.
- [43] K. Debnath, I. Singh, and A. Dvivedi, "Drilling Characteristics of Sisal Fiber-Reinforced Epoxy and Polypropylene Composites," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 29, no. 11–12, pp. 1401–1409, 2014, doi: 10.1080/10426914.2014.941870.
- [44] K. Debnath, I. Singh, and A. Dvivedi, "On the analysis of force during secondary processing of natural fiber-reinforced composite laminates," *Polym. Compos.*, vol. 38, no. 1, pp. 164–174, 2017, doi: 10.1002/pc.23572.
- [45] V. Chaudhary and P. P. Gohil, "Investigations on Drilling of Bidirectional Cotton Polyester Composite," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, no. 7, pp. 960–968, 2016, doi: 10.1080/10426914.2015.1059444.
- [46] N. Venkateshwaran and A. ElayaPerumal, "Hole quality evaluation of natural fiber composite using image analysis technique," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 32, no. 16, pp. 1188–1197, 2013, doi: 10.1177/0731684413486847.
- [47] A. Athijayamani, M. Thiruchitrabalam, U. Natarajan, and B. Pazhanivel, "Influence of alkali-treated fibers on the mechanical properties and machinability of roselle and sisal fiber hybrid polyester composite," *Polym. Compos.*, vol. 31, no. 4, pp. 723–731, 2010, doi: 10.1002/pc.20853.
- [48] M. Ramesh, T. Sri Ananda Atreya, U. S. Aswin, H. Eashwar, and C. Deepa, "Processing and mechanical property evaluation of banana fiber reinforced polymer composites," *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 563–572, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.284.
- [49] S. O. Ismail, H. N. Dhakal, E. Dimla, J. Beaugrand, and I. Popov, "Effects of drilling parameters and aspect ratios on delamination and surface roughness of lignocellulosic HFRP composite laminates," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 133, no. 7, 2016, doi: 10.1002/app.42879.
- [50] N. Abilash and M. Sivapragash, "Optimizing the delamination failure in bamboo fiber reinforced polyester composite," *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 28, no. 1, pp. 92–102, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.09.004>.
- [51] A. Díaz-Álvarez, J. Díaz-Álvarez, C. Santiuste, and M. H. Miguélez, "Experimental and numerical analysis of the influence of drill point angle when drilling biocomposites," *Compos. Struct.*, vol. 209, pp. 700–709, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.11.018.

- [52] G. D. Babu, K. S. Babu, and B. U. M. Gowd, "Effects of drilling parameters on delamination of hemp fiber reinforced composites," *Int. J. Mech. Eng. Res. Dev.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2012.
- [53] S. A. S. Azuan, "Effects of Drilling Parameters on Delamination of Coconut Meat Husk Reinforced Polyester Composites," *Adv. Environ. Biol.*, vol. 7, no. 6, pp. 1097–1100, 2013, doi: 10.1007/978-3-642-38345-8_6.
- [54] M. Roy Choudhury, M. S. Srinivas, and K. Debnath, "Experimental investigations on drilling of lignocellulosic fiber reinforced composite laminates," *J. Manuf. Process.*, vol. 34, pp. 51–61, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.032>.
- [55] W.-C. Chen, "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 37, no. 8, pp. 1097–1108, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8).
- [56] D. Chandramohan and K. Marimuthu, "Drilling of Natural Fiber Particle Reinforced Polymer Composite Material," *Int. J. Adv. Eng. Res. Stud.*, vol. 1, no. 1, pp. 134–145, 2011.
- [57] L. M. P. Durão *et al.*, "Drilling delamination outcomes on glass and sisal reinforced plastics," *Mater. Sci. Forum*, vol. 730–732, pp. 301–306, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.301.

Conclusion générale 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 :

- 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.
- 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.
- Les contributions des différents facteurs dans les conditions optimales de forage pour les outils HSS-TiN et BSD sont respectivement : vitesse d'avance (66,04%, 66,03%), diamètre du foret (10,54%, 14,63%) et vitesse de coupe (0,30% pour les deux). Cette optimisation est jugée de bonne qualité grâce à un facteur de désirabilité global de 97%.
- Les modèles prédictifs sont en bon accord avec les résultats obtenus lors des mesures expérimentales. Les pourcentages d'erreur moyens entre les résultats du modèle et ceux des mesures expérimentales sont de 0,26% pour le foret HSS-TiN et de 1,01% pour le foret BSD.

Recommandations pour 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 par la suite des travaux afin approfondir la recherche et surmonter ses limites.

- 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.
- 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.

Annexe



Drilling of a bidirectional jute fibre and cork-reinforced polymer biosandwich structure: ANN and RSM approaches for modelling and optimization

Zohir Tabet^{1,2} · Ahmed Belaadi^{1,2} · Messaouda Boumaaza³ · Mostefa Bourchak⁴

Received: 6 May 2021 / Accepted: 6 July 2021

© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature 2021

Abstract

The present study examined the effects of drilling parameters such as spindle speed (N), feed rate (f), diameter of the tools (d) and drill geometry such as twist drills (HSS-TiN) and brad and spur drills (BSD) used on delamination damage in a biosandwich structure consisting of an epoxy matrix reinforced with bidirectional jute fibres and cork (JFCE). Response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANNs) were exploited to evaluate the influence and interaction of the cutting parameters on the delamination factor (F_d) at the output during drilling. In addition, several optimization methods, such as desirability-based RSM, the genetic algorithm (GA) and the fmincon function, were applied to validate the optimal combination of cutting parameters (f , N and d) in the structures studied in biosandwiches during this research. According to the experimental results, severe damage was indeed observed with the BSD tool ($F_d = 1.684$) compared to the HSS-TiN tool ($F_d = 1.555$) for the same cutting conditions. To obtain the minimum F_d , the optimum conditions obtained by GA were respectively 1397.54 rev/min, 51.162 mm/min and 5.981 mm for HSS-TiN for f , N and d .

Keywords Industrial fabrics/textiles · Sandwich structures · Delamination · Drilling/machining · RSM/ANN · Genetic algorithm optimisation

1 Introduction

Over the past twenty years, plant fibres have proven to be an attractive environmentally friendly alternative to glass fibres in organic matrix composites due to the growth potential of plant fibres in the industrial sector [1–3]. The use of natural fibres as a reinforcement for polymer matrix composites has aroused, in recent years, the interest of researchers and

industrialists from an economic and ecological point of view [4, 5]. This use is justified, first, by the use of local resources, development of materials and taking into account the environmental impact technologies and the reduction of production costs while maintaining good performance compared to that of synthetic fibre (glass and carbon). On the other hand, this is due to the potential of natural fibres in terms of mechanical properties that can compete for certain types of plant fibres, with synthetic fibres commonly used in industry [6–8]. Natural fibres are initially biodegradable and are often considered neutral to CO₂ emissions into the atmosphere because their biodegradation produces only a quantity of carbon dioxide. Biocomposites are therefore easier to recycle. These are mainly used in many fields, such as construction, sports, and transport. Indeed, in order to better understand the behaviour of these biocomposites, in-depth scientific studies have been carried out by several researchers [9, 10]. Currently, there are a wide variety of plant fibres that are currently used as reinforcements for different matrices [11], such as sisal [12], jute [12, 13], *Agave americana* L. [14], flax [15, 16], *Washingtonia filifera* [17], *Luffa Vine* [18] and bamboo [19].

✉ Ahmed Belaadi
a.belaadi@univ-skikda.dz; ahmedbelaadi1@yahoo.fr

¹ Département de génie mécanique, Faculté de Technologie, Université 20 août 1955, Skikda, Algérie

² Laboratoire LSPN, Université 8 mai 1945, Guelma, Algérie

³ Laboratoire de Génie Civil & Hydraulique (LGCH), Université 8 Mai, 1945 Guelma, Algérie

⁴ Aerospace Engineering Department, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

However, machining is also an important operation when preparing composite surfaces for bonding assembly for multi-material applications [20]. The machinability of composites mainly depends on the structure and intrinsic characteristics of the fibres and the mechanical properties between the fibres and the resin responsible for the creation of various defects during machining, especially delamination, cracking, uncut fibres and the tearing of fibres, which lead to rough surfaces [21–23]. In the case of biocomposites with biofibre reinforcement, the mechanical behaviour of the fibres must be taken into account since this behaviour is much more prominent than that of the matrix, and because of the influence, this behaviour will have on the final state of the machined part. Several research works have addressed machining during the drilling of composites with synthetic fibres of glass, aramid and carbon to study the mechanisms of interaction between the cutting tools and the material and identify the most influential machining parameters in relation to the behaviour of the fibres and thus choose the most suitable process [24–31]. However, the literature contains only a limited number of works dealing with machining biocomposites [32–55] and comparative studies between biocomposites and composites with glass fibres [56]. The phenomenon most studied by researchers is delamination during drilling. Indeed, several theories and techniques exist in the literature to determine the delamination factor [21, 31, 57, 58]. Indeed, standard high-speed steel twist drills (HSS) [39, 46, 47, 50, 54, 55, 59] or tungsten carbide (WC) [47] is the most common tools used. The drill point angle is usually chosen to be 118° with tool diameters ranging from 3 to 14 mm. There are also other types of tools tested for drilling biocomposites, such as a tungsten carbide brad drill [56] and an HSS drill with two cutting edges [55].

Aravindh and Umanath used Taguchi's method in the case of drilling NFC biocomposites (jute, sisal and bamboo fibres) to determine the optimal drilling conditions to minimise delamination. The authors estimated the contributions of different elements under optimal drilling conditions, including drill diameter (88.19%), feed rate (7.64%) and spindle speed (2.62%). Drilling tests conducted by Mercy et al. [60] on epoxy reinforced with pineapple fibre biocomposites at different orientations were performed under different machining conditions using an L_{27} orthogonal array from Taguchi. The results showed that a lower feed rate, higher speed and smaller drilling diameter minimise the pushing force. Nagamadhu et al. [61] conducted a study of delamination during drilling to different drill diameters of a composite sandwich reinforced vinyl ester with unidirectional sisal fibres using various cutting parameters. The authors used the Taguchi method L_9 to optimise the input parameters to minimise delamination. The researchers concluded that the optimal parameters of drill diameter, spindle speed and feed rate given by ANOVA were 6 mm, 3000 rpm and 50 mm/min, respectively. Machado et al.

[62] proposed a new method for evaluating F_d (delamination factor). This technique is based on digital radiography image acquisition of the damaged area during drilling. In a recent work, Belaadi et al. [21] conducted an interesting investigation aimed at the effect of drilling parameters such as spindle speed, feed rate and drilling diameters on short jute fibre/polyester biocomposites to evaluate the effect of the delamination factor F_d . In other recent work, Belaadi et al. [22] developed an ANN model to assess the interactions of cutting parameters to analyse delamination. In their tests, hole exit damage was measured using a high-resolution scanner and then processed by ImageJ to calculate the delamination factor. The results revealed that delamination is sensitive to each cutting parameter.

Therefore, the novelty of this study is to focus on the influence of drilling parameters on the delamination factor of biosandwich structures using cork agglomerated cores with epoxy reinforced with woven jute fibres (WJF). Two tools with different diameters were chosen: conventional HSS-TiN (high-speed steel coated with titanium nitride) drills and wood drills (brad and spur), to estimate the influence and simultaneous interaction of the input parameters on the factor F_d . Indeed, response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANNs) were utilised to estimate the influence and interaction of cutting parameters on output delamination in drilling. Finally, optimization functions such as desirability based on the RSM method, function *fmincon* and genetic algorithm (GA) were employed to confirm the optimal combination of optimal cutting parameters (f , N and d) in the biosandwich structures studied in this work.

2 Materials and methods

2.1 Biosandwich manufacturing

In this study, the reinforcement is composed of a bidirectional jute fibre (Fig. 1) having a surface mass of 160 g/m^2 (28×23 yarns/100 mm) and an epoxy resin classified as MEDAPOXY STR, furnished by the GRANITEX company (Algeria), which has a density of 1.110 kg/m^3 . The average tensile mechanical properties of epoxy resin used in this paper have been described by Belaadi et al. and Cherief et al. [12, 22] in previous work (tensile strength of 43.13 MPa, elongation of 4.03% and Young's modulus of 2.47 GPa). Additionally, materials were used as agglomerate cores in the manufacturing of biosandwich samples as cork, with a thickness of 15 mm and a nominal density of 280 kg/m^3 . The jute fabric, agglomerate cork and epoxy resin were procured from local sources. The preparation of the biosandwich samples (jute/cork/epoxy) was performed by a contact moulding process by hand and then cut to dimensions of $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$. The obtained sandwich structure was a rectangular sheet 300 mm long, 300 mm

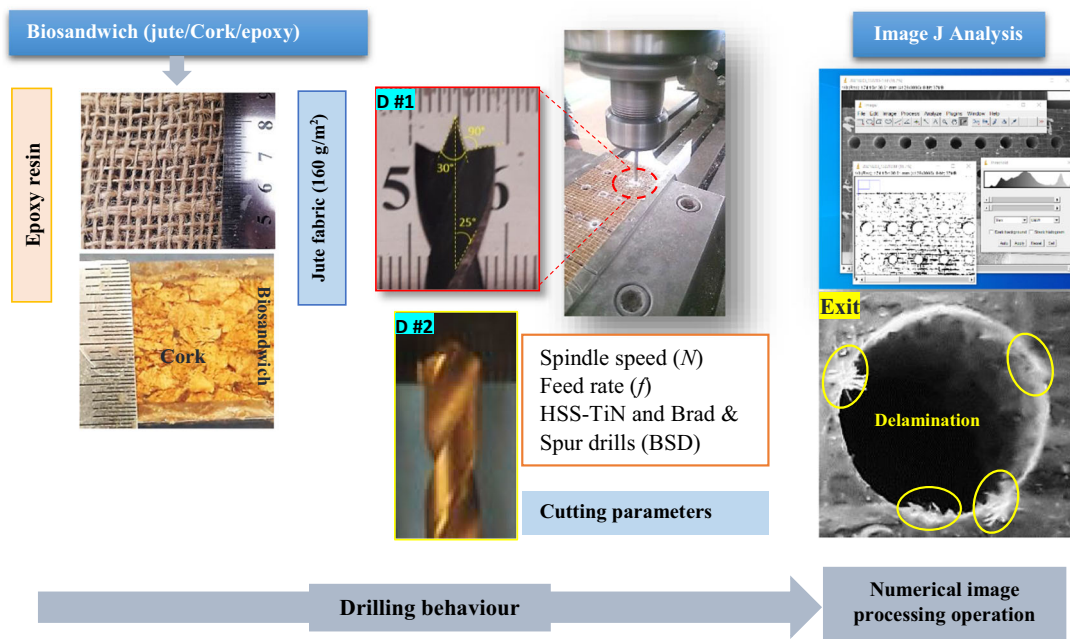


Fig. 1 Schematic arrangement of experimental setup of the biosandwich structure

Table 1 Process parameters available in open literature for drilling of jute fibre-reinforced polymer composites

Matrix	Fibre	Fibre content (% w/w)	Cutting parameters				References
			Tool material	Drill diameter d (mm)	Feed rate f (mm/rev)	Spindle speed N (rpm)	
Epoxy	Unidirectional jute	-	HSS twist drills	6, 8, 10	50, 150, 250 (mm/min)	1000, 2000, 3000	[49]
Polyester	Treated and untreated jute fabric	30	HSS twist drill	6	0.03, 0.06, 0.09, 0.12	9.42, 15.07, 20.72, 26.36 (m/min)	[50]
Epoxy and polyester	Treated and untreated jute fabric	30	HSS twist drill	6	0.03, 0.06, 0.09, 0.12	500, 800, 1100, 1400	[51]
Polypropylene (PP)	Jute fabric	30, 40, 50	Twist drills, Jo drills, parabolic drills	8	0.05, 0.12, 0.19	900, 1800, 2800	[52]
Epoxy	Jute fabric	43	HSS twist drill, CoroDrill 854, N ₂ OC, CoroDrill 856, N ₂ OC	8	0.05, 0.10, 0.15	750, 1250, 1750	[67]
Polyester	Glass-sisal-jute	-	Brad and spur, coated carbide	6, 9, 12	0.04, 0.06, 0.08	1000, 2000, 3000	[68]
Vinyl-ester	Untreated Vetiver-jute-glass	-	Twist drills, 60°, 90°, 120°, 150°	10	0.1, 0.2, 0.3, 0.4	500, 1000, 1500, 2000	[69]
Vinyl-ester	Treated (NaOH) Vetiver-jute-glass	-	Twist drills, 60°, 90°, 120°, 150°	10	0.1, 0.2, 0.3, 0.4	500, 1000, 1500, 2000	[70]
Epoxy	Glass-flax-jute	-	Drill bit carbide	6, 8, 10	0.1, 0.2, 0.3	600, 1200, 1800	[71]
Polyester	Short jute fibre 5, 10 and 15 mm	40	Brad & Spur drills, Twist drills	5, 7, 10	50, 108, 190 (mm/min)	355, 710, 1400	[21]
Epoxy	Jute fabric (210 g/m ²)	40	Brad & Spur drills, Twist drills (HSS), Twist drills (HSS-TiN)	5, 7, 10	50, 108, 190 (mm/min)	355, 710, 1400	[22]
Polyester	Jute fabric and steel fibres	-	HSS, 90°, 120°, 150°	8, 10, 12	0.1, 0.2, 0.3	500, 1250, 2000	[72]
Polypropylene	Unidirectional Jute	30	HSS, Co-HSS	2, 3, 4	0.1, 0.2, 0.3	600, 1260, 2700	[73]
Epoxy	Jute and flax fabric	-	HSS, HSS-TiN, WC	4	0.01, 0.015, 0.020	2500, 5000, 7500	[74]
Epoxy	Jute fabric (160 g/m²) and cork	30	Brad and spur drills and twist drills (HSS-TiN)	5, 7, 10	50, 108, 190 (mm/min)	355, 710, 1400	This work

Table 2 Design of experiments

n°	Factors	Notation	Unite	Levels		
				-1 Lowest	0 Central	+1 Highest
1	Spindle speed	<i>N</i>	rev/min	355	710	1400
2	Feed rate	<i>f</i>	mm/min	50	108	190
3	Drill diameter	<i>d</i>	mm	5	7	10

wide and approximately 20 ± 0.8 mm thick and was made up of five layers. In addition, the biosandwich had a 30% fibre content by weight. The EBJWC assembly was cured and held in the mould at atmospheric standard pressure (1 bar) until curing was complete for 24 hours at an ambient temperature of 25 °C. The plates were kept in open air for 15 to 20 days to ensure complete polymerisation of the resin. Finally, they were then post-cured at 50 °C for 8 hours in an oven. Following fabrication, the samples for drilling experiments were cut to the following dimensions: $290 \times 100 \times 20$ mm³. A diamond saw was used to cut the specimens, which were lubricated with water to avoid heating caused by the cutting

process. The specimens were then air-dried at room temperature (25 °C) for 20 days.

2.2 Drilling experimental procedure

The drilling tests were performed with a MOMAC universal drill using a 1400 rev/min spindle and a feed rate of 4.6 to 1040 mm/rev [21, 22], and all drilling was performed on this machine. To reduce the bending of the parts (and thus not include the influence of this structural parameter in this study) while drilling the hole, a solid steel support was used underneath the parts in the sandwich to avoid amplifying the size of the defect at the exit of the hole. To perform the drilling tests, we need a workpiece (EBJWC) size geometry of $290 \times 100 \times 20$ mm³ and a device for fixing the part is shown in Fig. 1. Brad and spur and twist HSS-TiN drills of different diameters (5 mm, 7 mm and 10 mm) were used in this study, whose shape and tool geometry are presented in Fig. 1. It is important to note that hole drilling in this study is performed in one phase (step). To obtain high-quality holes and prevent the drilling tool wear factor, the drill bit was replaced with a new bit after four to five operations. Drilling was done dry without coolant. In addition, other settings were also

Fig. 2 Typical holes drilled on jute/cork/epoxy biosandwich plate **a** entrance, **b** cross section and **c** exit delamination for three test (#4, #13 and #22)

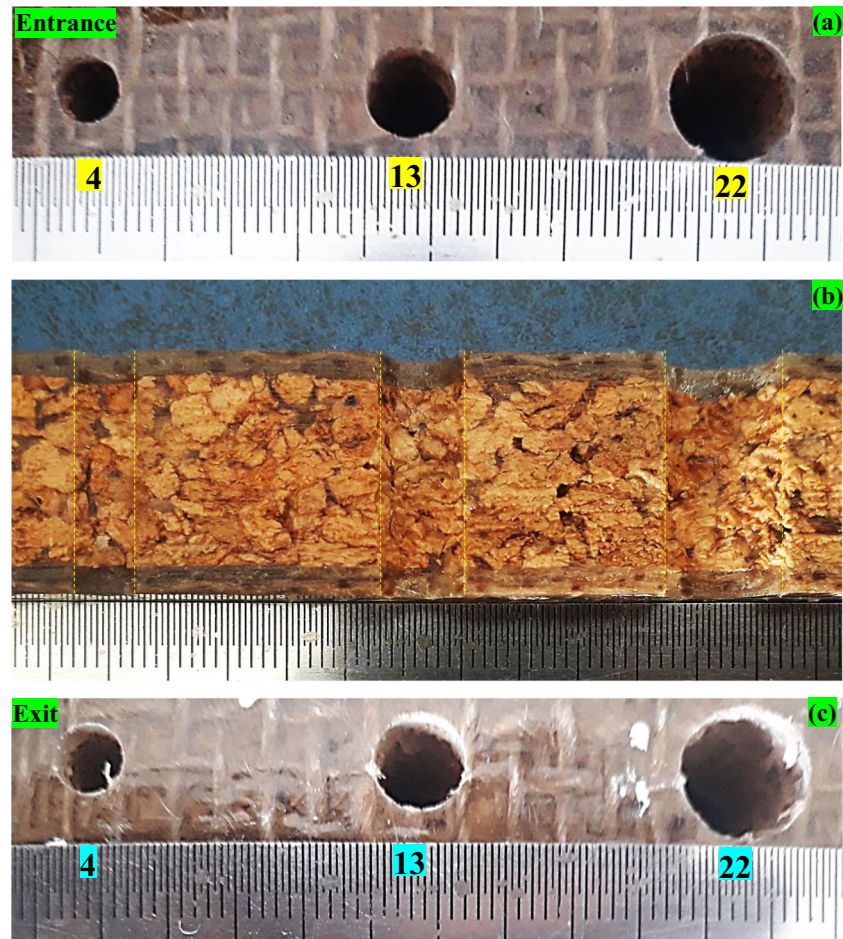


Table 3 Experimental results for delamination factor of the drilled holes at the exit

Test number	Input variables			Output variables					
	<i>f</i> (mm/min)	<i>N</i> (rev/min)	<i>d</i> (mm)	<i>F_d</i> (HSS-TiN)			<i>F_d</i> (BSD)		
				EXP	RSM	ANN	EXP	RSM	ANN
1	50	355	5	1.084	1.087	1.121	1.132	1.154	1.097
2	108	355	5	1.176	1.152	1.190	1.194	1.287	1.211
3	190	355	5	1.312	1.309	1.299	1.485	1.468	1.433
4	50	710	5	1.025	1.107	1.053	1.113	1.051	1.053
5	108	710	5	1.218	1.173	1.229	1.221	1.193	1.166
6	190	710	5	1.334	1.333	1.334	1.358	1.387	1.351
7	50	1400	5	1.045	1.092	1.029	1.117	1.034	1.094
8	108	1400	5	1.201	1.163	1.221	1.141	1.195	1.328
9	190	1400	5	1.355	1.328	1.344	1.423	1.416	1.640
10	50	355	7	1.127	1.086	1.113	1.306	1.280	1.147
11	108	355	7	1.181	1.168	1.193	1.413	1.412	1.361
12	190	355	7	1.321	1.350	1.313	1.678	1.591	1.573
13	50	710	7	1.117	1.109	1.101	1.121	1.194	1.143
14	108	710	7	1.217	1.193	1.274	1.429	1.335	1.392
15	190	710	7	1.320	1.377	1.319	1.479	1.528	1.498
16	50	1400	7	1.119	1.100	1.108	1.102	1.211	1.065
17	108	1400	7	1.246	1.188	1.248	1.387	1.370	1.347
18	190	1400	7	1.302	1.378	1.319	1.594	1.589	1.634
19	50	355	10	1.136	1.161	1.134	1.199	1.256	1.241
20	108	355	10	1.206	1.270	1.219	1.431	1.386	1.361
21	190	355	10	1.464	1.488	1.419	1.559	1.563	1.595
22	50	710	10	1.298	1.188	1.241	1.277	1.196	1.225
23	108	710	10	1.279	1.298	1.276	1.301	1.335	1.339
24	190	710	10	1.481	1.520	1.487	1.443	1.525	1.603
25	50	1400	10	1.171	1.188	1.194	1.272	1.263	1.199
26	108	1400	10	1.275	1.302	1.200	1.414	1.420	1.366
27	190	1400	10	1.555	1.529	1.546	1.684	1.637	1.577

employed, such as 355, 710 and 1400 rpm spindle speeds and three feed rates that we chose (50, 108 and 190 mm/min). The selection of machining parameters was based on a literature review, which is presented in Table 1.

Next, drilled samples were digitally scanned with a high-resolution scanner at up to 2400 × 4800 dpi (48 bit internal colour depth) to obtain a high-quality image. Image digital

results are imported into and processed in ImageJ (free software v1.47, published by the National Institute of Health, USA [50, 51, 63]) for damage area measurement of the drilled hole *F_d*, and the threshold factor was fitted to indicate delamination surrounding the hole. Delamination is a main damage defect in the drilling of laminated composites. The procedure used to acquire different damaged areas in a drilled hole is

Table 4 Mathematical models for delamination factor for drilling of jute fabric-cork /epoxy biosandwich structure obtained with RSM method

RSM response	Drill geometry HSS-TiN
<i>F_d</i>	$1.252 - 0.579 \times 10^{-3} \times f + 0.106 \times 10^{-3} \times N - 0.070 \times d + 1.016 \times 10^{-7} \times f \times N + 1.504 \times 10^{-4} \times f \times d + 4.110 \times 10^{-6} \times N \times d + 5.725 \times 10^{-6} \times f^2 - 7.276 \times 10^{-8} \times N^2 + 0.005 \times d^2$
<i>F_d</i>	BSD $+0.442 + 2.258 \times 10^{-3} \times f - 0.709 \times 10^{-3} \times N + 0.225 \times d + 4.631 \times 10^{-7} \times f \times N - 1.100 \times 10^{-5} \times f \times d + 2.425 \times 10^{-5} \times N \times d - 5.286 \times 10^{-7} \times f^2 + 2.565 \times 10^{-7} \times N^2 - 0.014 \times d^2$

Table 5 ANOVA for the response surface quadratic model for delamination factor

Source	DF	SS	MS	F-value	P-value	Cont. %	Remarks
(a) ANOVA for delamination factor of HSS-TiN							
Model	9	0.47	0.052	13.34	< 0.0001		Significant
<i>f</i>	1	0.35	0.35	89.92	< 0.0001	66.04	Significant
<i>N</i>	1	2.338E-003	2.338E-003	0.60	0.4483	0.30	
<i>d</i>	1	0.083	0.083	21.47	0.0002	10.54	Significant
<i>f</i> × <i>N</i>	1	1.732E-004	1.732E-004	0.045	0.8352	0.02	
<i>f</i> × <i>d</i>	1	8.508E-003	8.508E-003	2.19	0.1570	1.08	
<i>N</i> × <i>d</i>	1	3.626E-004	3.626E-004	0.093	0.7635	0.05	
<i>f</i> × <i>f</i>	1	4.405E-003	4.405E-003	1.14	0.3016	0.56	
<i>N</i> × <i>N</i>	1	1.843E-003	1.843E-003	0.47	0.5000	0.23	
<i>d</i> × <i>d</i>	1	5.568E-003	5.568E-003	1.43	0.2474	0.71	
Error	17	0.066	3.880E-003				
Total	26	0.53					
<i>SD</i> = 0.062						<i>R</i> ² = 87.59%	
Mean = 1.245						<i>R</i> ² adjusted = 81.02%	
Coefficient of variation = 4.999%						<i>R</i> ² predicted = 70.51%	
Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 0.156						Adequate precision = 11.681	
(b) ANOVA for delamination factor of BSD							
Model	9	0.7036	0.0782	15.8494	0.0000		Significant
<i>f</i>	1	0.5200	0.5200	105.4197	0.0000	66.03	Significant
<i>N</i>	1	0.0024	0.0024	0.4799	0.4978	0.30	
<i>d</i>	1	0.1152	0.1152	23.3487	0.0002	14.63	Significant
<i>f</i> × <i>N</i>	1	0.0036	0.0036	0.7290	0.4051	0.46	
<i>f</i> × <i>d</i>	1	0.0000	0.0000	0.0092	0.9246	0.00	
<i>N</i> × <i>d</i>	1	0.0126	0.0126	2.5587	0.1281	1.60	
<i>f</i> × <i>f</i>	1	0.0000	0.0000	0.0076	0.9315	0.00	
<i>N</i> × <i>N</i>	1	0.0229	0.0229	4.6458	0.0458	2.91	
<i>d</i> × <i>d</i>	1	0.0430	0.0430	8.7090	0.0089	5.46	
Error	17	0.0839	0.0049				
Total	26	0.7875					
<i>SD</i> = 0.070						<i>R</i> ² = 89.35%	
Mean = 1.343						<i>R</i> ² adjusted = 83.71%	
Coefficient of variation = 5.23%						<i>R</i> ² predicted = 73.49%	
Predicted residual error of sum of squares (PRESS) = 0.208						Adequate precision = 14.101	

shown in Fig. 1. The damage (delamination) was estimated in terms of the delamination factor (*F_d*). The delamination factor at exit was determined by the following equation:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \tag{1}$$

where *D* is the nominal diameter of the drilled hole, *D_{max}* is the maximum diameter of delamination and *F_d* is a conventional delamination factor.

An orthogonal array (*L*₂₇) of central composite design (CCD) was adopted as the experimental design in this study. It was selected to decrease the number of experiments. Therefore, the experimental cost and time were minimised. For all three factors, namely, the drill diameter (*d*), spindle

speed (*N*) and feed rate (*f*), three levels in each factor were envisaged in this study (Table 2).

3 Results and discussion

3.1 Influence of the drilling parameters on the delamination factor

Figure 2 illustrates the condition of the holes drilled at the entrance and the exit (#4, #13 and #22) with feed rates of 50, 108 and 190 mm/min and a spindle speed of 355 rpm. Digital images of the machined biosandwich plates were taken with a resolution of 4800 pixels using a professional scanner. Two concentric circles were drawn using an image processing

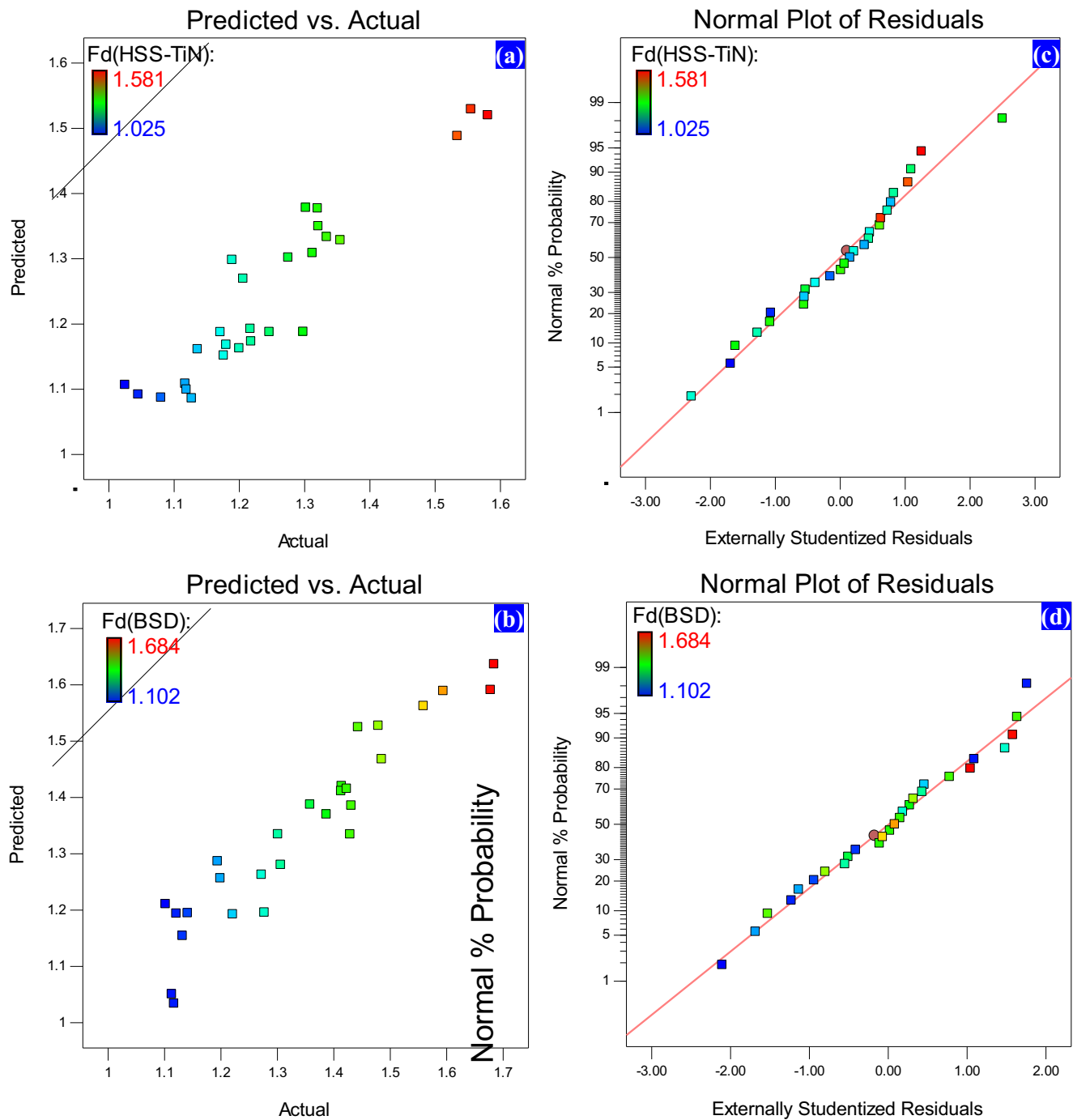


Fig. 3 a, b Predicted vs. actual values and c, d Normal probability distribution of the F_d residuals for different drills used in this work

software. The damage caused by drilling holes in the manufacture of biosandwiches is part of the delamination factor. This is conditioned by the choice of cutting parameters as well as by the fibre fabric used. Delamination is a fundamental concern for the choice of cutting parameters during the design process. Determination of the delamination factor F_d of biosandwich structures with agglomerated cork-core with epoxy skins reinforced with woven jute (EBJWC) for two drills

using HSS-TiN and BSD is related to many factors such as feed rate, cutting speed and tool diameter.

3.2 Response surface methodology and ANOVA for delamination factor

The experimental results were processed using a response surface analysis and to determine the relationship between

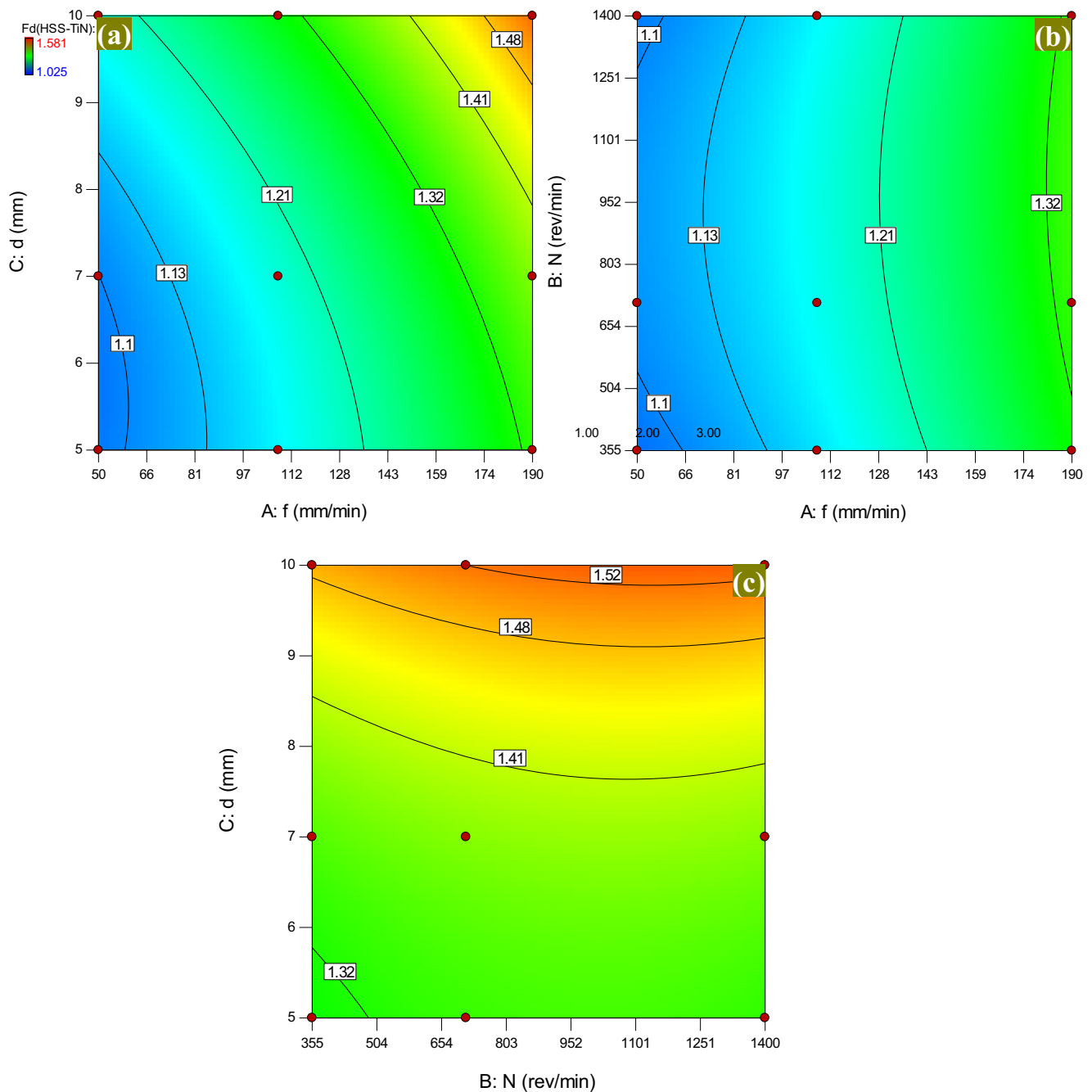


Fig. 4 Representation of the response surfaces of the F_d data with HSS-TiN drill: **a** Feed rate vs. drill diameter, **b** Feed rate vs. spindle speed and **c** Spindle speed vs. drill diameter

the delamination and different cutting parameters for HSS-TiN and BSD. Table 3 shows the output parameters represented by the delamination factor for the two drills used in the present study, F_d (HSS-TiN) and F_d (BSD), performed under different machining conditions. These results were obtained according to the optimal design, which consists of analysing the influence of numerical factors on the responses with three levels and three input parameters (f , N and d). Indeed, response surface methodology (RSM) is a mathematical and

statistical method that is generally used in applied science and analytical problems such as the mechanics and machining of materials [64]. In addition, this technique represents an empirical modelling approach with the objective of finding the relationship between the input and output parameters, that is, delamination F_d , by changing the different cutting parameters during the drilling of biosandwiches. The mathematical equations of the regression are presented in Tables 4, 5 for the different delamination factors obtained by the Design-Expert

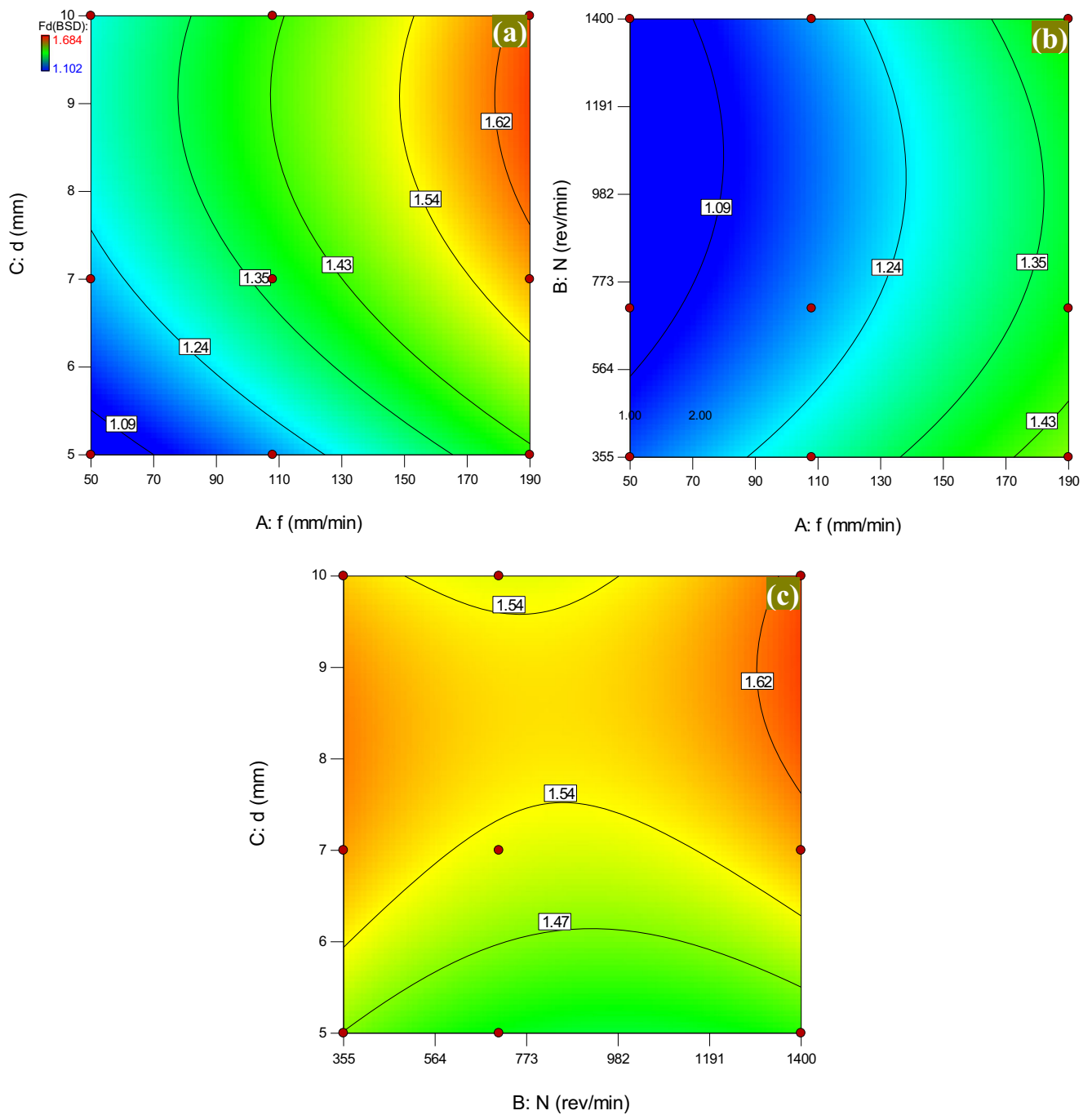


Fig. 5 Representation of the response surfaces of the F_d data with BSD drill: **a** Feed rate vr. drill diameter, **b** Feed rate vr. spindle speed and **c** Spindle speed vr. drill diameter

software, which recommended quadratic models. Quadratic regression models are second-order mathematical models based on the RSM. Figure 3a and b highlight the relationship of predicted and experimental results for biosandwich structure delamination of HSS-TiN and BSD drills. Thus, the results obtained show satisfactory agreement of the regression model since the predicted values are statistically identical to the experimental values with a confidence level of 95%. The

normal probability curves of the delamination residues F_d are shown in Fig. 3c and d; the straight lines reveal a good distribution of errors. The synthesis of the relevance of the results reveals that the quadratic model is statistically significant for the analysis of delamination. Table 4 shows the results of the quadratic ANOVA model. The R^2 coefficient and the adjusted R^2 coefficient corresponding to the delamination are 87.59% and 81.02% for HSS-TiN and 89.35% and 83.71% for BSD,

Fig. 6 3D surface plots of delamination factor versus f , N and d of biosandwiches structures

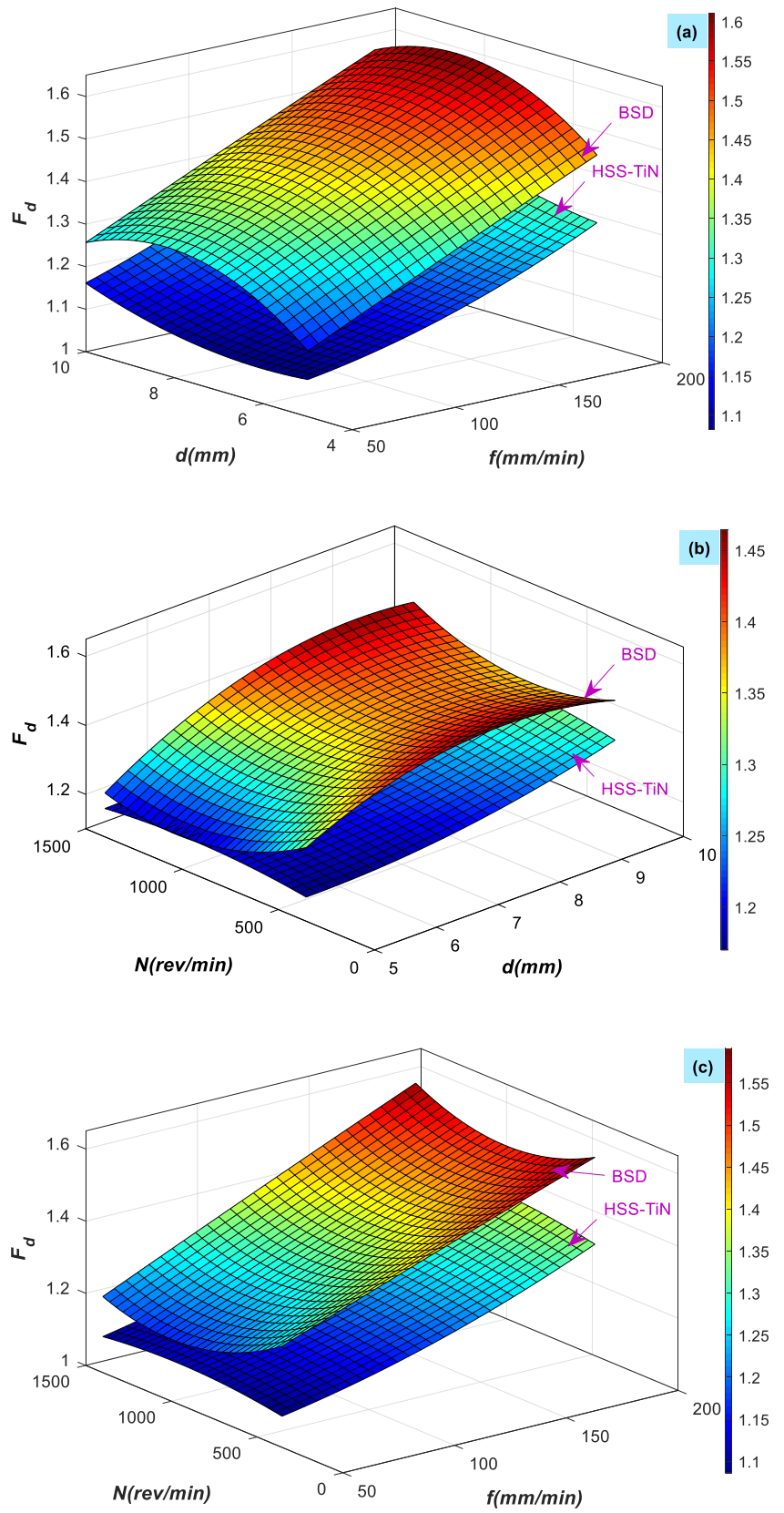
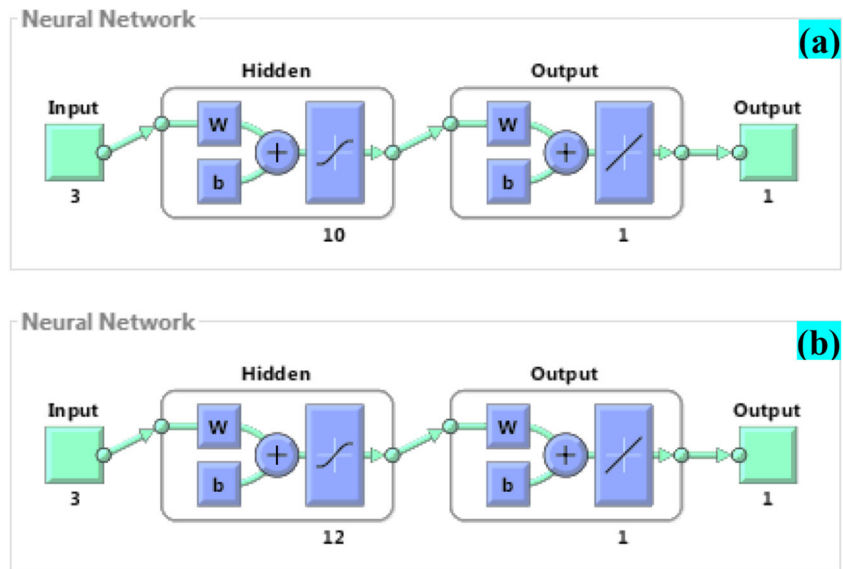


Fig. 7 ANN architecture used for a HSS-TiN and b BSD tool



respectively. It is therefore obvious that this regression model offers a perfect match between the responses and the independent factors. The model is statistically significant because the p value corresponding to the model is less than 0.05. Additionally, factors f and d have significant effects on delamination. Due to the larger F_d value, it appears that the feed rate f and the diameter d are the most significant parameters for the delamination of HSS-TiN and BSD composites compared to N . The rest of the terms in the model are considered insignificant. Therefore, it appears that the feed rate is the main parameter that affects the delamination factor, followed by the diameter and the cutting speed (N). In addition, the contribution of the factor f is the most important (66.04% and 66.03%) for HSS-TiN and BSD. The cutting speed has a less significant influence on delamination than the diameter on delamination.

3.3 3D surface plots for the delamination factor

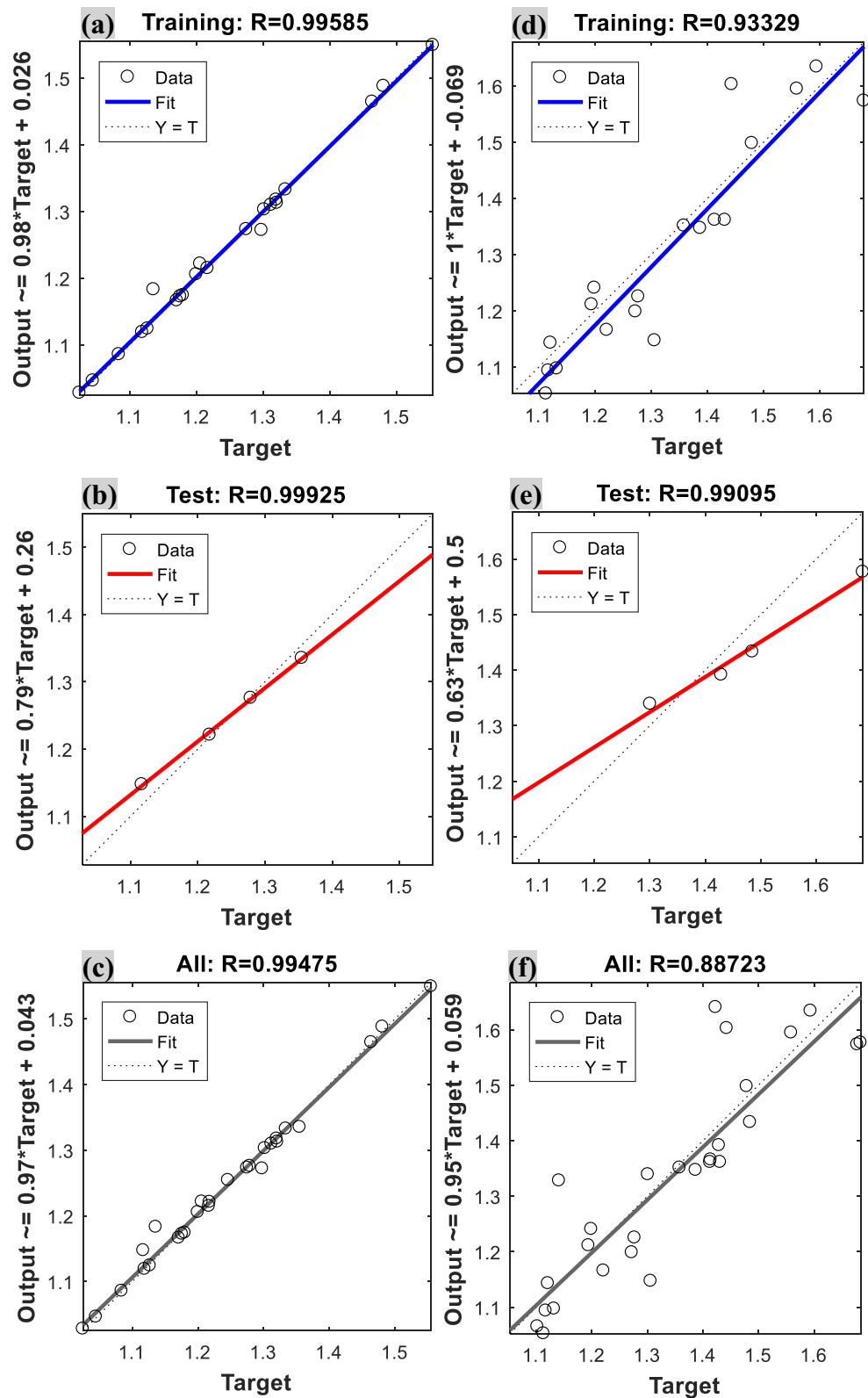
Figures 4 and 5 describe a mapping in the form of the response surfaces provided for the delamination at the exit of the

biosandwiches machined by the HSS-TiN and BSD drills as a function of the feed rate (f) and the cutting speed (N) and of the diameter (d). For the HSS-TiN tool, the delamination does not exceed 1.10 with a feed rate between 50 and 60 mm/min and a diameter of 5 to 7 mm, but further, the delamination exceeds 1.48 when the spindle speed is between 178 and 190 mm/min and a diameter of 9.4 to 10 mm (Fig. 4a). For the BSD tool, we also notice that the delamination does not exceed 1.09 for feed rates between 50 and 70 mm/min and a diameter of 5 to 5.5 mm, but it exceeds 1.62 when the cutting speed is between 185 and 190 mm/min and a diameter of 7.8 to 10 mm (Fig. 5a). Figures 4b and 5b show how the feed rate and spindle speed significantly affect delamination for the HSS-TiN and BSD drills. It can be seen that the delamination increases significantly with increasing feed rate and very slightly with increasing spindle speed. For HSS-TiN and BSD, the delamination is less than 1.10 when the feed rate is between 50 and 64 mm/min and the cutting speed is between 355 and 1400 rpm and is 1.09 for BSD when the feed rate is between 50 and 75 mm/min and that N is between 562 and 1400 rev/min. The delamination also seems to rise above 1.32

Table 6 ANN and MSE and R values architectures for training, validation and testing for HSS-TiN and BSD tools

Model	Network structure		Percentage	Samples	RMSE	R value
$F_{d(\text{HSS-TiN})}$	3-10-1	Training	85	22	1.55738E-4	9.95854E-4
		Validation	5	1	7.09654E-5	0.00000E-0
		Testing	15	4	3.34586E-4	9.99250E-4
$F_{d(\text{BSD})}$	3-12-1	Training	70	19	4.89445E-3	9.33291E-1
		Validation	4	4	2.14720E-2	8.00842E-1
		Testing	4	4	4.26253E-3	9.90948E-1

Fig. 8 Regression validation scheme of F_d data a–c HSS-TiN and e, f BSD tools



for HSS-TiN when the feed rate is between 182 and 190 mm/min and N is between 510 and 1400 rpm and equals 1.43 for BSD when the feed rate is between 174 and 190 mm/min and

the spindle speed is between 355 and 1400 rpm. This corresponds perfectly to the results obtained in the work of Belaadi et al. [21, 22] in the case of epoxy/jute fabric biocomposites

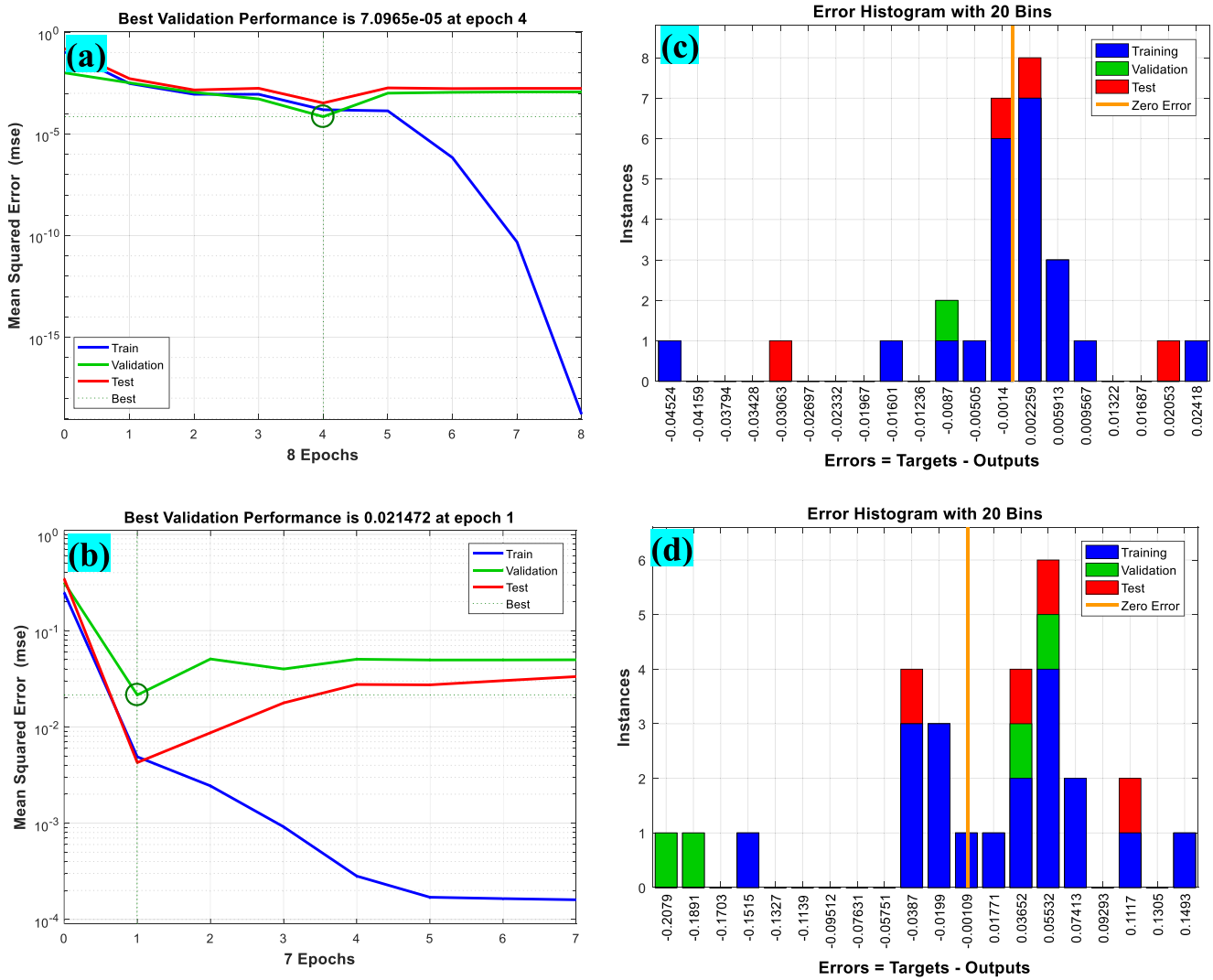


Fig. 9 ANN validation results a, b HSS-TiN and c, d BSD tools

for the same cutting conditions. The effect of drill bit diameter and cutting speed (N) on delamination is shown in Figs. 4c and 5c. From this figure, it appears that the delamination increases as the diameter increases and increases slightly with the increase of N . The delamination is less than 1.32 and 1.47, when the diameter of the tool (d) and cutting speed are between 5 and 5.8 mm and 355 and 484 rpm for the HSS-TiN tool and 5 and 5.7 mm and 355 and 1400 rpm for the BSD drill, respectively. In addition, it is also observed that F_d seems to exceed 1.52 and 1.62 when d and N are between 9.8-10 mm and 790-1400 rpm for HSS-TiN and 7.8-10 mm and 1295-1400 rpm for BSD, respectively. Figure 6 presents the evolution of the delamination factor as a function of cutting parameters such as the feed rate (f), spindle speed (N) and diameter (d). The delamination factor increases with increasing feed rate and drill diameter, as shown in Fig. 6a. The influence of these two cutting conditions (f and d) is also considerable; this is mainly due to the forces produced and the amount of material removed during machining. Figure 6b illustrates the effect

of drill diameter and spindle speed on F_d for the two drills comprising HSS-TiN and BSD for a constant feed rate. The diameter of the drill has a great influence on the spindle speed, as clearly shown in Fig. 6b for the first drill (HSS-TiN). In the event that the diameter of the drill bit is kept constant (Fig. 6c), the factor F_d increases with the increasing effect of the feed rate. On the other hand, by increasing the spindle speed, the delamination factor decreases. Generally, it emerges from Fig. 6 that the HSS-TiN drill (≈ 1.02 to 1.55) produces lower F_d values than the BSD drill (≈ 1.11 to 1.68).

3.4 Prediction of delamination factor by ANN model

The data were integrated into the network model by the input layer and the response by the output layer. A multilayer perceptron consisting of an input layer, a hidden layer and an output layer was used for the prediction of the delamination factor. The architecture design of the ANN network was designed using the MATLAB Neural

Table 7 Mathematical models for F_d for drilling of jute fabric-cork/epoxy biosandwich structure obtained with ANN method

ANN response	Drill geometry
	HSS-TiN
F_d	$1.1311+0.0657 \times H_1-0.3190 \times H_2-0.0701 \times H_3-0.1217 \times H_4-0.1666 \times H_5-0.0713 \times H_6+0.0514 \times H_7+0.0852 \times H_8+0.0594 \times H_9+0.0596 \times H_{10}$ $\begin{cases} H_1 = \tanh(0.5 \times (-0.0014 \times f + 0.0028 \times N + 0.4176 \times d - 5.7214)) \\ H_2 = \tanh(0.5 \times (-0.0058 \times f - 0.0001 \times N + 0.1945 \times d - 2.0769)) \\ H_3 = \tanh(0.5 \times (0.0307 \times f - 0.0011 \times N - 0.5380 \times d + 0.0155)) \\ H_4 = \tanh(0.5 \times (-0.0115 \times f + 0.0011 \times N - 0.5036 \times d + 5.5530)) \\ H_5 = \tanh(0.5 \times (-0.0160 \times f + 0.0010 \times N + 0.15627 \times d + 0.3691)) \\ H_6 = \tanh(0.5 \times (-0.0277 \times f - 0.0018 \times N + 0.1578 \times d + 4.2872)) \\ H_7 = \tanh(0.5 \times (-0.0205 \times f + 0.0026 \times N - 0.7482 \times d + 7.7941)) \\ H_8 = \tanh(0.5 \times (0.0088 \times f - 0.0023 \times N + 0.2148 \times d + 0.4729)) \\ H_9 = \tanh(0.5 \times (-0.0145 \times f + 0.0005 \times N + 0.6481 \times d - 4.9045)) \\ H_{10} = \tanh(0.5 \times (0.0002 \times f + 0.0003 \times N + 0.4914 \times d - 4.5155)) \end{cases}$
	BSD
F_d	$1.3203-1.630 \times H_1+1.4059 \times H_2+0.4465 \times H_3+0.9034 \times H_4+0.0229 \times H_5-0.8512 \times H_6+0.0710 \times H_7-0.6178 \times H_8+0.20575 \times H_9+0.6614 \times H_{10}+0.9535 \times H_{11}+0.4120 \times H_{12}$ $\begin{cases} H_1 = \tanh(0.5 \times (0.2113 - 0.0010 \times f + -0.0000 \times N - 0.01422 \times d)) \\ H_2 = \tanh(0.5 \times (-0.1455 + 0.0008 \times f + -0.0000 \times N + 0.0080 \times d)) \\ H_3 = \tanh(0.5 \times (-0.0393 + 0.0002 \times f - 0.0000 \times N + 0.0024 \times d)) \\ H_4 = \tanh(0.5 \times (-0.0819 + 0.0005 \times f - 0.0000 \times N + 0.0038 \times d)) \\ H_5 = \tanh(0.5 \times (-0.0004 + 0.0000 \times f - 0.0000 \times N - 0.0002 \times d)) \\ H_6 = \tanh(0.5 \times (0.0587 - 0.0004 \times f + 0.0000 \times N - 0.0021 \times d)) \\ H_7 = \tanh(0.5 \times (-0.0033 + 0.0000 \times f + 0.0000 \times N - 0.0003 \times d)) \\ H_8 = \tanh(0.5 \times (0.0538 - 0.0003 \times f + 0.0000 \times N - 0.0031 \times d)) \\ H_9 = \tanh(0.5 \times (-0.0153 + 0.0001 \times f + 0.0000 \times N + 0.0005 \times d)) \\ H_{10} = \tanh(0.5 \times (-0.0554 + 0.0003 \times f - 0.0000 \times N + 0.0022 \times d)) \\ H_{11} = \tanh(0.5 \times (-0.0851 + 0.0005 \times f - 0.0000 \times N + 0.0042 \times d)) \\ H_{12} = \tanh(0.5 \times (-0.0344 + 0.0002 \times f - 0.0000 \times N + 0.0015 \times d)) \end{cases}$

Network Toolbox. Modelling by neural networks constitutes a powerful approach, making it possible to reproduce the behaviour of any nonlinear process of any kind [65]. For HSS-TiN and BSD drills, three neurons in the input layer, the hidden layers contain ten and twelve neurons, respectively, and one neuron for the output layer (Fig. 7). Determining the number of neurons in the hidden layers relies on reducing the error as the number of hidden nodes increases [66]. Table 6 shows the tested ANN architectures and MSE and R values for training, validation and testing of F_d data for the HSS-TiN and BSD drill tools. These neurons are linked together by means of weight weights. In Figure 8a–f, neural network prediction of F_d delamination and experimental test results for HSS-TiN and BSD tools, respectively, are compared for the training, testing and validation data sets. It emerges from Figs. 8 and 9 that the ANN prediction corresponds perfectly to the experimental results. The ANN models thus developed for HSS-TiN and BSD (Table 7) have the ability to interpret the data well and can serve as an efficient prediction tool for the delamination factor. In addition, the results show that the model is an efficient and applicable way to measure the delamination factor of biosandwiches made from jute fabric.

3.5 Comparison of RSM and ANN models

A comparison of the results predicted by the ANN and RSM models with those obtained experimentally are presented in Fig. 10. It was found that the two models satisfactorily describe the results obtained experimentally. The maximum absolute percentage error in the prediction of the delamination factors of the HSS-TiN and BSD tools by the ANN model is 4.16% and 6.28%, respectively, while in the RSM model, this percentage is 6.93% and 7.78% (Fig. 9). Thus, the ANN model provides a more accurate prediction than the RSM model. To the extent that these error rates are low, we can say that the optimization process is appropriate and that the model provides response prediction with high accuracy.

3.6 Optimisation of responses

Figures 12 and 13 illustrate the distribution of the ramp function and the mapping of the desirability contour for the two types of drill material as well as their combination in Fig. 12c. The main objective of the optimization is to determine the cutting parameters as well as the minimization of the delamination factors. The cutting parameters used in the optimization process are shown in Table 8, and the optimised values of the

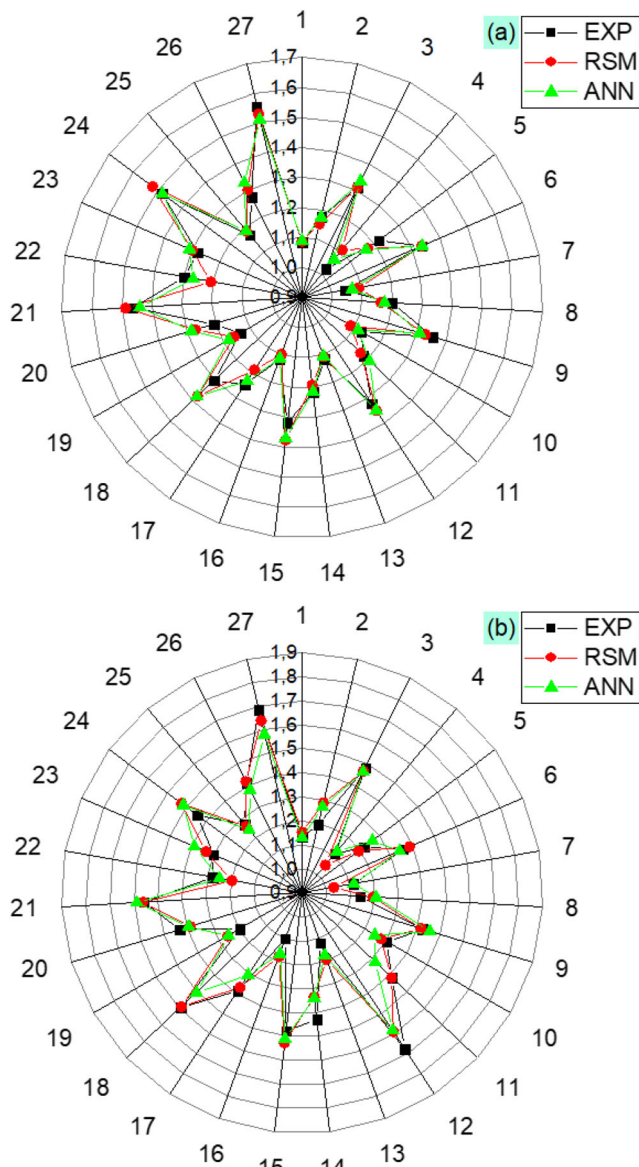


Fig. 10 Comparison between experimental and predicted F_d with RSM and ANN models. a HSS-TiN and c BSD drills

factors and responses are shown in Table 9. The ten runs are chosen due to the desirability factor near the unit. The first ten tests show that a high cutting speed and feed rate and a small tool diameter are suitable for reducing the delamination factor with desirability rates of 0.98 and 1.00 for HSS-TiN and BSD, respectively (Fig. 12a and b). Indeed, according to the highest desirability value equal to 0.97, the optimal drilling machining conditions according to Table 9 ($f = 50$ mm/min, $N = 1399.99$ rev/min and $d = 5.61$ mm) lead to minimal delamination (F_d) for HSS-TiN and BSD, whose values were 1.09 and 1.10, respectively.

The models obtained by the ANN method were retained for the resolution of the optimization problem using the genetic algorithm (GA) and for the search for the minimal multi-

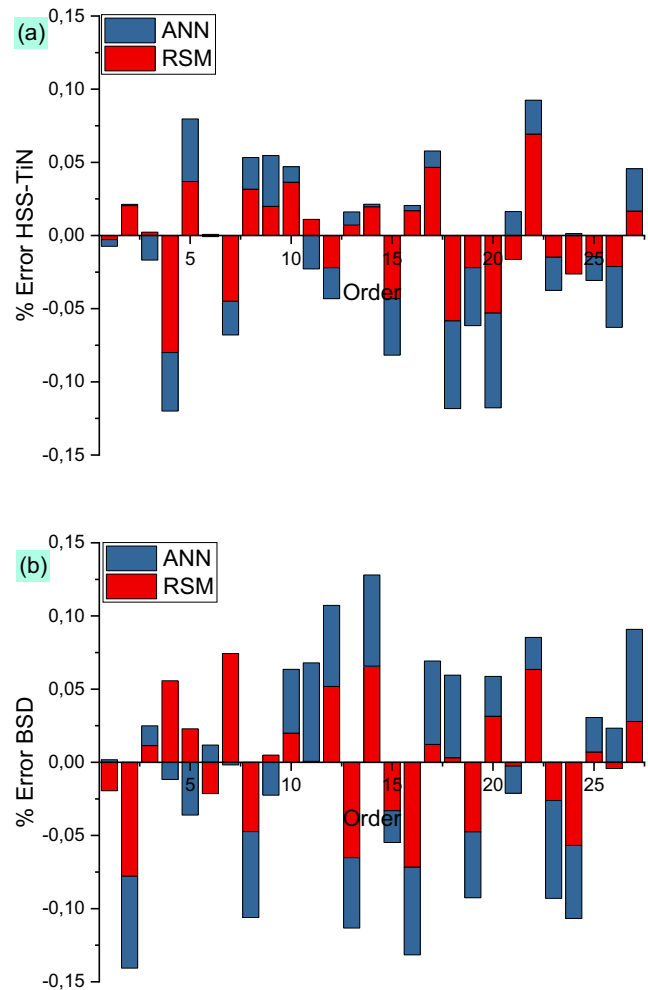


Fig. 11 F_d residuals for RSM and ANN a HSS-TiN and b BSD drills

variable nonlinear constraint function (fmincon) using MATLAB software. Table 10 shows the results obtained from the optimization of the input parameters and F_d for the two drill geometries (HSS-TiN and BSD). The results indeed reveal that the response of the GA and fmincon parameters provide approximately similar values. The results for comparison between the response parameters (F_d) obtained for the HSS-TiN and BSD tools with RSM and those predicted by the GA and fmincon algorithm are 1.08 and 1.03 obtained by

Table 8 Goals and parameter ranges for RSM optimization of cutting conditions.

Condition	Goal	Lower limit	Upper limit
Feed rate, f (mm/min)	Is in range	50	190
Spindle speed, N (rev/min)	Is in range	355	1400
Drill, d (mm)	Is in range	5	10
$F_{d(HSS-TiN)}$	Minimise	1.025	1.581
$F_{d(BSD)}$	Minimise	1.102	1.684

Table 9 Response optimization for response parameters using RSM

Test n°	Machining parameters			Response parameters		Desirability
	f (mm/min)	N (rev/min)	d (mm)	$F_{d(\text{HSS-TiN})}$	$F_{d(\text{BSD})}$	
1	50.000	1399.987	5.607	1.090	1.100	0.969
2	50.006	1399.971	5.629	1.090	1.102	0.969
3	50.000	1399.992	5.579	1.090	1.097	0.969
4	50.001	1399.999	5.508	1.090	1.090	0.969
5	50.001	1399.982	5.312	1.091	1.069	0.969
6	50.553	1400.000	5.610	1.091	1.101	0.969
7	50.000	1399.645	5.226	1.091	1.060	0.969
8	50.001	1399.989	5.146	1.091	1.051	0.969
9	50.000	1394.381	5.225	1.091	1.059	0.969
10	50.001	1399.983	5.085	1.092	1.044	0.969

RSM, 1.04 and 1.05 in the case of GA and 1.04 and 1.09 for the function *fmincon*, respectively, confirming the relevance of the models and the adequacy of the results with those obtained by [21].

4 Conclusion

The present research focused on the development and optimization of jute fibre polymer composite delamination factors with two types of HSS-TiN and BSD drills. The results obtained above showed following conclusions:

- Based on the effects of the combination of cutting parameters in the drilling process, a combination of a low feed rate and small tool diameter is clearly needed to minimise the delamination factor
- The importance of the material and the feed rate in relation to the diameter of the drill are predominant on the delamination factor, and it has been noticed that spindle speed has no influence on the latter. The contribution of the different elements of the optimal drilling condition are as follows: feed rate (66.04%), drill diameter (10.54%) and spindle speed
- The quality of the optimization is considered good with an overall desirability factor of 97%
- The results of the predictive models and the experimental measurements are in good agreement
- The average error percentages between the model and the experimental results are 0.26% for the HSS-TiN drill and 1.01% for the BSD drill
- The ANN and RSM models applied to predict the cutting parameters in the drilling processes show very high agreement with the experimental data. The experimental results

compared with those predicted by the RSM and ANN models indicate that ANN models are more accurate and produce excellent results

Indeed, manufacturers seek to obtain better machinability of their products, regardless of the material. This detailed study will make it possible to choose the most appropriate machining conditions to obtain better machinability.

Acknowledgments The authors gratefully acknowledge (la Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique, Algérie) DGRSDT for their support in this work.

Authors' contributions Zohir Tabet: Conceptualization, Investigation, Methodology, Writing—review and editing. Ahmed Belaadi: Conceptualization, Investigation, Methodology, Supervision, Writing—review and editing. Messaouda Boumaaza: Conceptualization, Investigation, Writing—review and editing. Mostefa Bourchak: Investigation, Writing—review and editing.

Funding The authors declare no funding information.

Data availability Not applicable.

Declarations

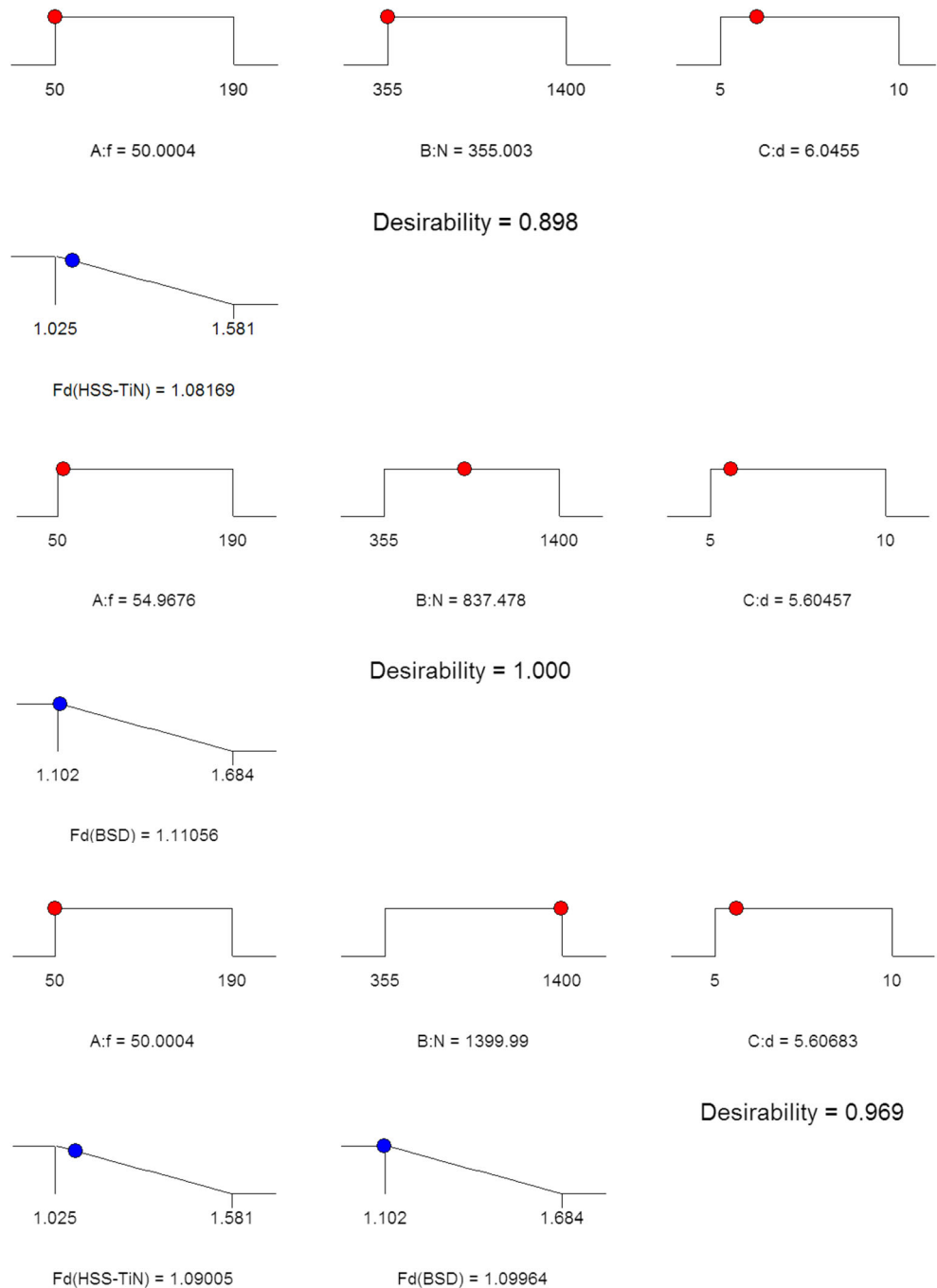
Competing interests The authors declare no competing interests.

Ethics approval The work contains no libellous or unlawful statements, does not infringe on the rights of others, or contains material or instructions that might cause harm or injury.

Consent to participate The authors consent to participate.

Consent for publication The authors consent to publish.

Fig. 12 Ramp function graph of multi-objective optimization **a** HSS-TiN, **b** BSD and **c** HSS-TiN and BSD tools



References

1. Manaia JP, Manaia AT, Rodrigues L (2019) Industrial hemp fibers: an overview. *Fibers* 7(12):106. <https://doi.org/10.3390/fib7120106>
2. Koronis G, Silva A, Fontul M (2013) Green composites: a review of adequate materials for automotive applications. *Compos Part B Eng* 44:120–127. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.004>
3. Shahzad A (2011) Hemp fiber and its composites – a review. *J Compos Mater* 46:973–986. <https://doi.org/10.1177/0021998311413623>
4. Baley C, Le Duigou A, Bourmaud A, Davies P (2012) Influence of drying on the mechanical behaviour of flax fibres and their unidirectional composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 43:1226–1233. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.03.005>
5. Le Duigou A, Baley C (2014) Coupled micromechanical analysis and life cycle assessment as an integrated tool for natural fibre composites development. *J Clean Prod* 83:61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.027>
6. Diabor E, Funkenbusch P, Kaufmann EE (2019) Characterization of cassava fiber of different genotypes as a potential reinforcement biomaterial for possible tissue engineering composite scaffold

Fig. 13 Contour plot of desirability for F_d for **a** HSS-TiN and **b** BSD tools

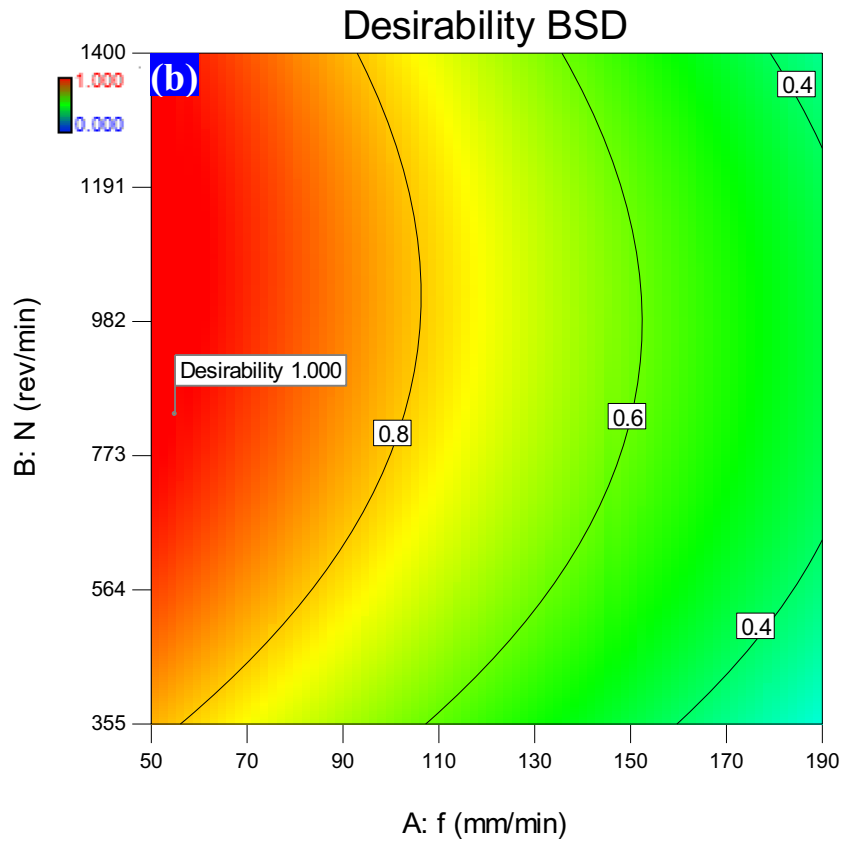
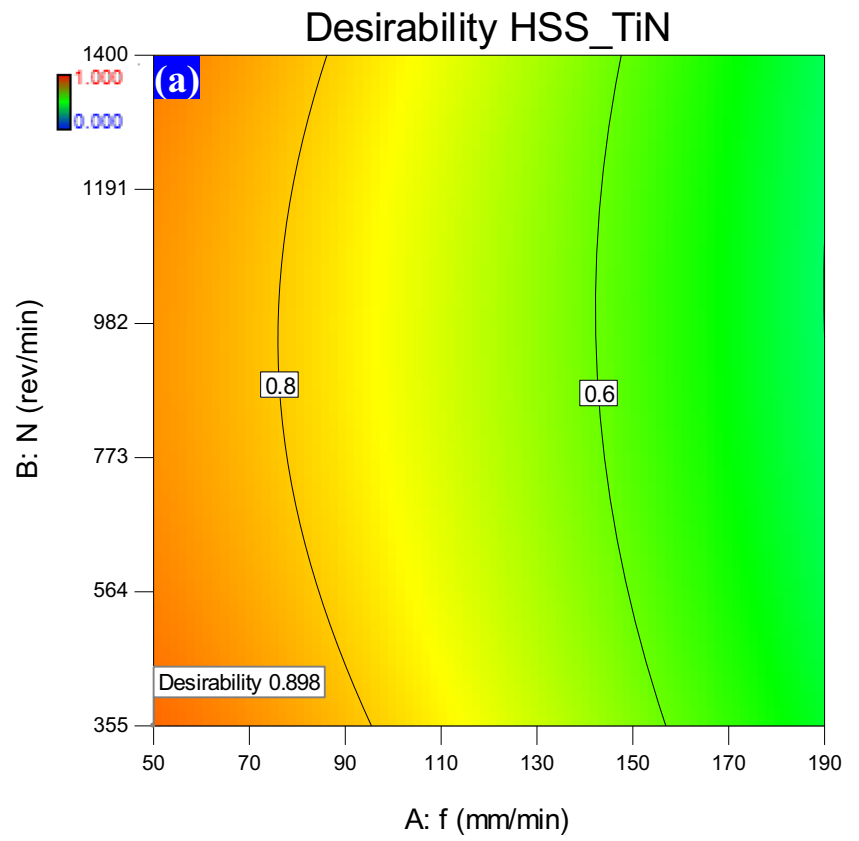


Table 10 Comparing the response optimization techniques RSM, GA and fmincon optimization

Machining parameters			Response parameters	
f (mm/min)	N (rev/min)	d (mm)	F_d	Tools
RSM optimization				
50.000	355.002	6.047	1.0822	HSS-TiN
57.029	1023.600	5.034	1.0351	BSD
GA optimization				
51.162	1397.54	5.981	1.0401	HSS-TiN
51.091	1378.07	5.960	1.0489	BSD
fmincon optimization				
50.979	1397.52	5.992	1.0404	HSS-TiN
51.109	1391.06	6.012	1.0942	BSD

application. *Fibers Polym* 20:217–228. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-8702-9>

7. Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, Sain M (2012) Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Prog Polym Sci* 37: 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
8. Amroune S, Belaadi A, Bourchak M, Makhoulouf A, Satha H (2020) Statistical and experimental analysis of the mechanical properties of flax fibers. *J Nat Fibers*. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1775751>
9. Zhou Y, Fan M, Chen L (2016) Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview. *101:31–45*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.055>
10. Rajmohan T, Vinayagamoorthy R, Mohan K (2019) Review on effect machining parameters on performance of natural fibre-reinforced composites (NFRCS). *J Thermoplast Compos Mater* 32:1282–1302. <https://doi.org/10.1177/0892705718796541>
11. Dutta S, Kim NK, Das R, Bhattacharyya D (2019) Effects of sample orientation on the fire reaction properties of natural fibre composites. *Compos Part B Eng* 157:195–206. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.118>
12. Cherief M, Belaadi A, Bouakba M, Bourchak M, Meddour I (2020) Behaviour of lignocellulosic fibre-reinforced cellular core under low-velocity impact loading: Taguchi method. *Int J Adv Manuf Technol*. 108:223–233. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05393-9>
13. Boumaaza M, Belaadi A, Bourchak M (2020) The effect of alkaline treatment on mechanical performance of natural fibers-reinforced plaster: optimization using RSM. *J Nat Fibers*. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1724236>
14. Jaouadi M, M'sahli S, Sakli F (2009) Optimization and characterization of pulp extracted from the *Agave americana* L. fibers. *Text Res J* 79:110–120. <https://doi.org/10.1177/0040517508090781>
15. Bedjaoui A, Belaadi A, Amroune S, Madi B (2019) Impact of surface treatment of flax fibers on tensile mechanical properties accompanied by a statistical study. *Int J Integr Eng* 6:10–17
16. Belaadi A, Amroune S, Bourchak M (2019) Effect of eco-friendly chemical sodium bicarbonate treatment on the mechanical properties of flax fibres: Weibull statistics. *Int J Adv Manuf Technol*. 106: 1753–1774. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04628-8>
17. Benzannache N, Belaadi A, Boumaaza M, Bourchak M (2021) Improving the mechanical performance of biocomposite plaster/Washingtonian filifira fibres using the RSM method. *J Build Eng* 33:101840. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2020.101840>
18. Weng B, Cheng D, Guo Y, Zhai S, Wang C, Xu R, Guo J, Lv Y, Shi L, Chen Y (2020) Properties of Natural Luffa Vine as potential reinforcement for biomass composites. *Ind Crops Prod* 155: 112840. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112840>
19. Engineering M, Ramzan M, Karim A, et al (2020) Sodium carbonate treatment of fibres to improve mechanical and water absorption characteristics of short bamboo natural fibres reinforced polyester composite. *Plast Rubber Compos* 49:425–433. <https://doi.org/10.1080/14658011.2020.1768336>
20. Malik K, Ahmad F, Gunister E (2021) Drilling performance of natural fiber reinforced polymer composites: a review. *J Nat Fibers*. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1870624>
21. Belaadi A, Laouici H, Bourchak M (2020) Mechanical and drilling performance of short jute fibre-reinforced polymer biocomposites: statistical approach. *Int J Adv Manuf Technol* 106:106–2006. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04761-4>
22. Belaadi A, Boumaaza M, Amroune S, Bourchak M (2020) Mechanical characterization and optimization of delamination factor in drilling bidirectional jute fibre-reinforced polymer biocomposites. *Int J Adv Manuf Technol*. 111:2073–2094. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06217-6>
23. Rao YS, Mohan NS, Shetty N, Shivamurthy B (2019) Drilling and structural property study of multi-layered fiber and fabric reinforced polymer composite - a review. *Mater Manuf Process* 34:1549–1579. <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1686522>
24. Zhang H, Zhu P, Liu Z, Qi S, Zhu Y (2020) Research on prediction method of mechanical properties of open-hole laminated plain woven CFRP composites considering drilling-induced delamination damage. *Mech Adv Mater Struct* 0:1–16. <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1745969>
25. Feito N, Díaz-Álvarez J, López-Puente J, Miguélez MH (2018) Experimental and numerical analysis of step drill bit performance when drilling woven CFRPs. *Compos Struct* 184:1147–1155. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.061>
26. Fernández-Pérez J, Cantero JL, Díaz-Álvarez J, Miguélez MH (2017) Influence of cutting parameters on tool wear and hole quality in composite aerospace components drilling. *Compos Struct* 178:157–161. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.043>
27. Feito N, Díaz-Álvarez J, López-Puente J, Miguélez MH (2016) Numerical analysis of the influence of tool wear and special cutting geometry when drilling woven CFRPs. *Compos Struct* 138:285–294. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.065>
28. Feito N, Díaz-Álvarez A, Cantero JL, Rodríguez-Millán M, Miguélez H (2016) Experimental analysis of special tool geometries when drilling woven and multidirectional CFRPs. *J Reinf Plast Compos* 35:33–55. <https://doi.org/10.1177/0731684415612931>
29. Díaz-Álvarez J, Olmedo A, Santiuste C, Miguélez MH (2014) Theoretical estimation of thermal effects in drilling of woven carbon fiber composite. *Materials (Basel)* 7:4442–4454. <https://doi.org/10.3390/ma7064442>
30. Díaz-Álvarez A, Rodríguez-Millán M, Díaz-Álvarez J, Miguélez MH (2018) Experimental analysis of drilling induced damage in aramid composites. *Compos Struct* 202:1136–1144. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.068>
31. Bayraktar Ş, Turgut Y (2020) Determination of delamination in drilling of carbon fiber reinforced carbon matrix composites/Al 6013-T651 stacks. *Measurement* 154:107493. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107493>
32. Chaitanya S, Singh I (2018) Ecofriendly treatment of aloe vera fibers for PLA based green composites. *Int J Precis Eng Manuf - Green Technol*. 5:143–150. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0015-8>
33. De Oliveira LÁ, Dos Santos JC, Panzera TH et al (2018) Investigations on short coir fibre-reinforced composites via full factorial design. *Polym Polym Compos* 26:391–399. <https://doi.org/10.1177/0967391118806144>

34. Bajpai PK, Debnath K, Singh I (2015) Hole making in natural poly(lactic acid) laminates: an experimental investigation. *J Thermoplast Compos Mater* 30:1–17. <https://doi.org/10.1177/0892705715575094>
35. Debnath K, Sisodia M, Kumar A, Singh I (2016) Damage-free hole making in fiber-reinforced composites: an innovative tool design approach. *Mater Manuf Process* 31:1400–1408. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1140191>
36. Debnath K, Singh I, Dvivedi A (2014) Drilling characteristics of sisal fiber-reinforced epoxy and polypropylene composites. *Mater Manuf Process* 29:1401–1409. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.941870>
37. Debnath K, Singh I, Dvivedi A (2017) On the analysis of force during secondary processing of natural fiber-reinforced composite laminates. *Polym Compos* 38:164–174. <https://doi.org/10.1002/pc.23572>
38. Chaudhary V, Gohil PP (2016) Investigations on drilling of bidirectional cotton polyester composite. *Mater Manuf Process* 31:960–968. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1059444>
39. Venkateshwaran N, ElayaPerumal A (2013) Hole quality evaluation of natural fiber composite using image analysis technique. *J Reinf Plast Compos* 32:1188–1197. <https://doi.org/10.1177/0731684413486847>
40. Athijayamani A, Thiruchitrabalam M, Natarajan U, Pazhanivel B (2010) Influence of alkali-treated fibers on the mechanical properties and machinability of roselle and sisal fiber hybrid polyester composite. *Polym Compos* 31:723–731. <https://doi.org/10.1002/pc.20853>
41. Ramesh M, Sri Ananda Atreya T, Aswin US et al (2014) Processing and mechanical property evaluation of banana fiber reinforced polymer composites. *Procedia Eng* 97:563–572. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.284>
42. Ismail SO, Dhakal HN, Dimla E, Beaugrand J, Popov I (2016) Effects of drilling parameters and aspect ratios on delamination and surface roughness of lignocellulosic HFRP composite laminates. *J Appl Polym Sci* 133. <https://doi.org/10.1002/app.42879>
43. Abilash N, Sivapragash M (2016) Optimizing the delamination failure in bamboo fiber reinforced polyester composite. *J King Saud Univ - Eng Sci* 28:92–102. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.09.004>
44. Azuan SAS, Juraidi JM, Muhamad WMW (2012) Evaluation of delamination in drilling rice husk reinforced polyester composites. *Appl Mech Mater* 232:106–110. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.232.106>
45. Diaz-Álvarez A, Díaz-Álvarez J, Santiuste C, Miguélez MH (2019) Experimental and numerical analysis of the influence of drill point angle when drilling biocomposites. *Compos Struct* 209:700–709. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.018>
46. Babu GD, Babu KS, Gowd BUM (2012) Effects of drilling parameters on delamination of hemp fiber reinforced composites. *Int J Mech Eng Res Dev* 2:1–8
47. Azuan SAS (2013) Effects of drilling parameters on delamination of coconut meat husk reinforced polyester composites. *Adv Environ Biol* 7:1097–1100. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38345-8_6
48. Roy Choudhury M, Srinivas MS, Debnath K (2018) Experimental investigations on drilling of lignocellulosic fiber reinforced composite laminates. *J Manuf Process* 34:51–61. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.032>
49. Aravindh S, Umanath K (2015) Delamination in drilling of natural fibre reinforced polymer composites produced by Compression moulding. In: *Advances in Materials and Manufacturing*. Trans Tech Publications 766-767:796–800. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767.796>
50. Sridharan V, Muthukrishnan N (2013) Optimization of machinability of polyester/modified jute fabric composite using grey relational analysis (GRA). *Procedia Eng* 64:1003–1012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.177>
51. Sridharan V, Raja T, Muthukrishnan N (2016) Study of the effect of matrix, fibre treatment and graphene on delamination by drilling jute/epoxy nanohybrid composite. *Arab J Sci Eng* 41:10–14. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-2005-2>
52. Yallem TB, Kumar P, Singh I (2015) A study about hole making in woven jute fabric-reinforced polymer composites. *Proc IMechE Part L J Mater Des Appl* 230:888–898. <https://doi.org/10.1177/1464420715587750>
53. Monteiro SN, Terrones LAH, D’Almeida JRM (2008) Mechanical performance of coir fiber/polyester composites. *Polym Test* 27: 591–595. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.03.003>
54. Jayabal S, Natarajan U (2011) Drilling analysis of coir – fibre-reinforced polyester composites. *Bull Mater Sci* 34:1563–1567. <https://doi.org/10.1007/s12034-011-0359-y>
55. Bajpai PK, Singh I (2013) Drilling behavior of sisal fiber-reinforced polypropylene composite laminates. *J Reinf Plast Compos* 32: 1569–1576. <https://doi.org/10.1177/0731684413492866>
56. Durão LMP, Gonçalves DJS, Tavares JMRS, de Albuquerque VHC, Panzera TH, Silva LJ, Vieira AA, Baptista APM (2013) Drilling delamination outcomes on glass and sisal reinforced plastics. *Mater Sci Forum* 730–732:301–306. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.301>
57. Chen W-C (1997) Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *Int J Mach Tools Manuf* 37:1097–1108. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00095-8)
58. Anand G, Alagumurthi N, Palanikumar K, Venkateshwaran N, Elansezhain R (2018) Influence of drilling process parameters on hybrid vinyl ester composite. *Mater Manuf Process* 33:1299–1305. <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1453161>
59. Chandramohan D, Marimuthu K (2011) Drilling of natural fiber particle reinforced polymer composite material. *Int J Adv Eng Res Stud I*:134–145
60. Mercy JL, Sivashankari P, Sangeetha M, Kavitha KR, Prakash S (2020) Genetic optimization of machining parameters affecting thrust force during drilling of pineapple fiber composite plates – an experimental approach. *J Nat Fibers*. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1788484>
61. M N, Upadhya R, Sehgal S, et al (2020) Mechanical and drilling process characterisation of herringbone sisal fabric reinforced vinyl ester sandwich composites. *Adv Mater Process Technol*. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1855963>
62. Machado CM, Silva D, Vidal C, Soares B, Teixeira JP (2021) A new approach to assess delamination in drilling carbon fibre-reinforced epoxy composite materials. *Int J Adv Manuf Technol*. 112:3389–3398. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06636-z>
63. Davim JP, Rubio JC, Abrao AM (2007) A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Compos Sci Technol* 67:1939–1945. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.10.009>
64. Majumder A (2010) Comparison of ANN with RSM in predicting surface roughness with respect to process parameters in Nd: YAG laser drilling. *Int J Eng Sci Technol* 2:5175–5186
65. Karnik SR, Gaitonde VN, Davim JP (2008) A comparative study of the ANN and RSM modeling approaches for predicting burr size in drilling. *Int J Adv Manuf Technol* 38:868–883
66. Benardos PG, Vosniakos G-C (2003) Predicting surface roughness in machining: a review. *Int J Mach Tools Manuf* 43:833–844. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2)
67. Rezaghi Maleki H, Hamed M, Kubouchi M, Arao Y (2019) Experimental study on drilling of jute fiber reinforced polymer composites. *J Compos Mater* 53:283–295
68. Ramesh M, Palanikumar K, Reddy KH (2014) Experimental investigation and analysis of machining characteristics in drilling hybrid

- glass-sisal-jute fiber reinforced polymer composites. In: 5th international & 26th all india manufacturing technology, design and research conference AIMTDR
69. Vinayagamoorthy R, Rajeswari N, Karthikeyan S (2015) Investigations of damages during drilling of natural sandwich composites. In: Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publ 766-767:812–817. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767.812>
 70. Vinayagamoorthy R, Rajeswari N, Sivanarasimha S, Balasubramanian K (2015) Fuzzy based optimization of thrust force and torque during drilling of natural hybrid composites. In: Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publ 787:265–269. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.787.265>
 71. Ramnath BV, Sharavanan S, Jeykrishnan J (2017) Optimization of process parameters in drilling of fibre hybrid composite using Taguchi and grey relational analysis. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing 183:12003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/183/1/012003>
 72. Vinayagamoorthy R (2017) Parametric optimization studies on drilling of sandwich composites using the Box–Behnken design. Mater Manuf Process 32:645–653. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1232811>
 73. Pailoor S, Murthy HNN, Sreenivasa TN (2021) Drilling of in-line compression molded jute/polypropylene composites. J Nat Fibers 18:91–104. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1612309>
 74. Çelik YH, Alp MS (2020) Determination of milling performance of jute and flax fiber reinforced composites. J Nat Fibers 00:1–15. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1764435>

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.