

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication mécanique et productive

Présenté par :

Hadj-seyd Abdessamed & Menasri Mohamed Elamine

Thème

Élaboration et détournage des composites

Hybrides luffa/jute

Devant le jury composé de :

Prénom et Nom	Grades	Qualité
ZAOUI Moussa	Professeur	Président
SLAMANI Mohamed	Professeur	Encadreur
DAOUDARI Ameer	MAA	Examineur

Année universitaire 2023/2024

N° d'ordre: GM/...../2024

Dédicace

À mes enseignants et encadrants, dont la sagesse et l'expertise ont illuminé mon chemin tout au long de cette recherche. Votre soutien inestimable et vos conseils avisés ont été les piliers sur lesquels j'ai construit ce travail.

À mes proches, famille et amis, qui ont été mes sources constantes de soutien, d'encouragement et de compréhension. Votre présence et votre soutien inconditonneont été ma force motrice dans les moments de doute et de difficulté.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à cette étude, que ce soit par leurs idées, leurs discussions inspirantes ou leur aide précieuse. Chaque contribution a enrichi ce travail et lui a donné une profondeur supplémentaire.

Et enfin, à l'université elle-même, source infinie d'inspiration et de matériaux, dont les fibres de luffa et de jute ont été le cœur même de cette étude. Puissions-nous continuer à apprendre de sa sagesse et à travailler en harmonie avec elle pour un avenir durable et prospère.

Résumé :

Ce mémoire examine l'élaboration et l'usinage de composites hybrides constitués de fibres végétales, en particulier de luffa et de jute, dans le but d'améliorer leurs propriétés mécaniques et esthétiques. Un plan d'expérience factoriel complet, comprenant 25 combinaisons de tests, a été mis en œuvre pour analyser l'impact des paramètres de coupe sur les surfaces usinées et les températures de coupe. Les échantillons ont été usinés en utilisant des modes de fraisage en opposition (up milling) et en avalant (down milling) sous des conditions de coupe identiques.

Les résultats expérimentaux ont démontré que le fraisage en opposition génère des surfaces plus lisses et moins rugueuses comparativement au fraisage en avalant, avec une réduction significative des fibres non coupées. De plus, l'analyse des températures de coupe a révélé des tendances complexes : des vitesses de coupe intermédiaires peuvent occasionner des températures plus basses que celles observées avec des vitesses de coupe plus élevées ou plus basses. Cette observation souligne que l'optimisation des paramètres de coupe exige une compréhension approfondie des interactions thermiques et mécaniques, plutôt que de simples hypothèses.

La caractérisation des surfaces usinées a été effectuée à l'aide de techniques d'observation et d'analyse avancées, incluant l'utilisation de microscopes optiques pour évaluer l'intégrité des surfaces et identifier les défauts. Les résultats montrent la présence de défauts tels que le délaminage, des cavités dues aux bulles d'air, la perte de résine et des fissures dans la matrice.

Mots clés : Composites hybrides ; Fibres végétales ; Luffa/Jute ; détourage ; Paramètres de coupe ; Qualité de surface ; Analyse thermique.

Abstract

This thesis examines the development and machining of hybrid composites made from vegetable fibers, specifically luffa and jute, with the aim of enhancing their mechanical and aesthetic properties. A full factorial experimental design, comprising 25 test combinations, was implemented to analyze the impact of cutting parameters on machined surfaces and cutting temperatures. The samples were machined using both up milling and down milling methods under identical cutting conditions.

The experimental results demonstrated that up milling produces smoother and less rough surfaces compared to down milling, with a significant reduction in uncut fibers. Furthermore, the analysis of cutting temperatures revealed complex trends : intermediate cutting speeds can result in lower temperatures compared to higher or lower cutting speeds. This observation highlights that optimizing cutting parameters requires a deep understanding of thermal and mechanical interactions rather than simplistic assumptions.

The characterization of machined surfaces was conducted using advanced observation and analysis techniques, including the use of optical microscopes to assess surface integrity and identify defects. The results revealed the presence of defects such as delamination, cavities caused by air bubbles, resin loss, and matrix cracks.

Keywords : Hybrid composites ; Plant fibers ; Luffa/Jute ; Trimming ; Cutting parameters ; Surface quality ; Thermal analysis.

ملخص:

يتناول هذا البحث تطوير وتشغيل المواد المركبة الهجينة المصنوعة من الألياف النباتية، وخاصة اللوفا والجوت، بهدف تحسين خصائصها الميكانيكية والجمالية. تم تنفيذ تصميم تجريبي شامل، يتضمن 25 مجموعة من الاختبارات، لتحليل تأثير معايير القطع على الأسطح المشغولة ودرجات حرارة القطع. تم تشغيل العينات باستخدام طريقتي التفريز العكسي (up milling) والتفريز الأمامي (down milling) تحت نفس ظروف القطع.

أظهرت النتائج التجريبية أن التفريز العكسي ينتج أسطحًا أكثر نعومة وأقل خشونة مقارنة بالتفريز الأمامي، مع تقليل كبير في الألياف غير المقطوعة. بالإضافة إلى ذلك، كشفت تحليل درجات حرارة القطع عن اتجاهات معقدة: يمكن أن تؤدي سرعات القطع المتوسطة إلى درجات حرارة أقل مقارنة بسرعات القطع العالية أو المنخفضة. تؤكد هذه الملاحظة أن تحسين معايير القطع يتطلب فهماً عميقاً للتفاعلات الحرارية والميكانيكية بدلاً من الافتراضات البسيطة.

تمت عملية توصيف الأسطح المشغولة باستخدام تقنيات مراقبة وتحليل متقدمة، بما في ذلك استخدام المجاهر البصرية لتقييم سلامة الأسطح وتحديد العيوب. أظهرت النتائج وجود عيوب مثل التفكك، التجايف الناتجة عن الفقاعات الهوائية، فقدان الراتنج، والتشققات في المصفوفة.

الكلمات المفتاحية: المركبات الهجينة؛ الألياف النباتية؛ اللوفا/الجوت؛ التشكيل؛ معايير القطع؛ جودة السطح؛ التحليل الحراري.

Tableau de figure:

FIGURE 1.1: CLASSIFICATION DES RENFORTS SUIVANT LEURS STRUCTURES	9
FIGURE1.2: QUELQUES STRUCTURES GEOMETRIQUES DES RENFORTS	10
FIGURE1.3: CLASSIFICATION DES FIBRES NATURELLES SUIVANT LEURS ORIGINES ADAPTEE DE ZHU ET AL. (2013), GORNET, (2008) ET DO THI (2006).....	11
FIGURE 1.4: COMPOSITION DE LA FIBRE NATURELLE ELEMENTAIRE TIREE DE NGUYEN (2016)	12
FIGURE 1.5: COUPE TRANSVERSALE DE FRUITS DE LUFFA	14
FIGURE 1.6: LES GRAINS DE LUFFA	14
FIGURE 1.7: L'ARBRE DE LUFFA	14
FIGURE 1.8: TISSU DE JUTE	15
FIGURE 1.9: PLANTE DE JUTE	15
FIGURE1.10: MECANISME DE COUPE DE DETOURAGE ORTHOGONALE EN FONCTION DE L'ORIENTATION DE PLIS UNIDIRECTIONNELS.	18
FIGURE 1.11: PROCEDE DE PERÇAGE. (A) LOCALISATION DES PRINCIPAUX DEFAUTS GENERES LORS DU PERÇAGE DES COMPOSITES EN CARBONE/EPOXY (B) SCHEMATISATION D'UN DEFAUT EN ENTREE DU TROU ADAPTE PAR ZITOUNE (2004).....	20
FIGURE 1.12: PHOTOGRAPHIES MEB DE LA SURFACE INTERIEURE D'UN TROU PERCE EN COMPOSITES POLYESTER RENFORCES DE FIBRES DE COCO: A FIBRES SAILLANTES ET EXTRACTION DE FIBRES, B SURFACE LISSE, REPRODUITE DEPUIS RAJAMURUGAN T (2022)	21
FIGURE 1.13: OPERATION DE CONTOURNAGE.	22
FIGURE 1.14: OPERATION DE DETOURAGE (FRAISAGE DE PROFIL)	22
FIGURE 2 1: PREPARATION DU MOULE.....	27
FIGURE 2 2: AGENTS DEMOULANT	27
FIGURE 2 3: FIBRES DE LUFFA ET DE JUTE	28
FIGURE 2 4: SUPERPOSITION DES COUCHES(LUFFA/JUTE) AVEC LA RESINE	29
FIGURE 2 5: LE CNC D'USINAGE (DETOURAGE).....	31
FIGURE 2 6: GABARIT POUR FIXER LES ECHANTILLONS DURANT L'USINAGE	32
FIGURE 2 7: FIXATION DE LA PLAQUE SUR LE MONTAGE.....	33
FIGURE 2 8: LE MONTAGE DE FIXATION DANS CNC	34
FIGURE 2 9: OUTIL DE COUPE.....	35
FIGURE 2 10: COUPE TRANSVERSALE DES OUTILS DE COUPE	35
FIGURE 2 11 NUMEROTATION DES ECHANTILLONS SELON LE MODE DE DETOURAGE, U : UP, D : DOWN	39
FIGURE 2 12: LES ETAPE DE DETOURAGE ET MESURE LA TEMPERATURE	39
FIGURE 3 1: IMAGE DES DEFAUTS D'USINAGE RENCONTRES LORS DU DETOURAGE COMPOSITE DE FIBRES LUFFA/JUTE	47
FIGURE 3 2: DOMMAGES THERMIQUE DE LA MATRICE ET DES FIBRES.	47
FIGURE 3 3: ILLUSTRATION METTANT EN EVIDENCE LA PRESENCE DE KAVITE, LA RUPTURE DES FIBRES.....	48
FIGURE 3 4: MODE DE FRAISAGE EN AVALANT ET MODE DE FRAISAGE EN OPPOSITION LORS D'UNE COUPE PERPENDICULAIRE À LA FIBRE, A) MODE DE DÉTOURAGE EN OPPOSITION PERPENDICULAIRE À LA FIBRE, $F=0.14\text{MM/REV}$ ET $VC = 100\text{M /MIN}$, B) MODE DE DÉTOURAGE AVALANT PERPENDICULAIRE À LA FIBRE, $F=0.14\text{MM/REV}$ ET $VC = 100\text{M /MIN}$	49
FIGURE 3 5: VARIATION DE LA TEMPERATURE DE COUPE EN FONCTION DE L'AVANCE ET DE LA VITESSE DE COUPE.....	53

Liste des tableaux :

TABEAUL1.1: PROPRIETES MECANQUES ET THERMIQUES DE QUELQUES RESINES THERMOPLASTIQUES ADAPTE DE GORNET (2008).....	7
TABEAU 1.2 : PROPRIETES MECANQUES ET THERMIQUES DE QUELQUES RESINES THERMODURCISSABLES TIRE DE GORNET (2008).....	8
TABEAU 1.3: DOMAINES D'APPLICATION DES COMPOSITES A FIBRES NATURELLES TIRE DE DELAHAIGUE (2015)	16
TABEAU 2 1: CARACTERISTIQUES DE L'OUTIL.....	35
TABEAU 2 2: PLAN D'EXPERIENCE FACTORIEL COMPLET POUR L'ÉTUDE DES COMBINAISONS DE PARAMETRES DE COUPE.....	40
TABEAU 3 1: COMPILATION DES IMAGES OBTENUES SELON LES CONDITIONS DE COUPE ET LES MODES D'USINAGE EN OPPOSITION (UP MILLING) ET EN AVALANT (DOWN MILLING).	51

Table des matières

Introduction générale :	2
Contexte	3
Problématique	3
Objectifs	4
1.1 Généralités sur les composites et leurs constituants :	6
1.1.1 Les matrices :	7
1.1.2 Les renforts :	8
1.1.2.1 Les fibres naturelles :	10
Les propriétés des fibres de luffa et de jute et leurs applications :	13
Luffa (Luffa cylindrica) :	13
Jute :	15
Application des composites à fibres naturelles :	16
Revue des méthodes d'usinage des composites hybrides :	17
Procédé de perçage :	20
Procédé de fraisage de profile (détourage) :	22
Introduction :	25
2.1-Élaboration des composites hybrides :	25
2.1.1-Sélection des matrices polymères et des procédés de fabrication adaptés :	25
2.1.1.1. Propriétés des matériaux de renfort :	25
2.1.1.2. Compatibilité de la matrice polymère :	26
2.1.1.3. Procédés de fabrication :	26
2.1.1.4. Renfort et distribution de la charge :	26
2.1.1.5. Propriétés finales du composite :	26
2.1.2-Technique de fabrication de composites par stratification manuelle (Hand lay-up technique):	27
2.1.2.1 Préparation du Moule:	27
2.1.2.2. Préparation des Matériaux:	28
2.1.2.3. Disposition des Fibres:	28
2.1.2.4- Superposition des Couches:	28

2.1.2.5- Application de la Résine:	29
2.1.2.6. Durcissement:	29
2.1.2.7. Démoulage:.....	30
2.1.2.8. Finition:	30
2.2-Étude du détourage des composites hybrides :.....	31
2.2.1-Machine utilisée :	31
2.2.2-Montage d'usinage utilisé :.....	33
2.2.3-Sélection des outils de fraisage appropriés pour les composites hybrides:	34
2.2.4- Évaluation des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, etc.) pour le fraisage des composites:.....	36
2.2.5- Développement du plan d'expérience:	38
2.2.7- Mesure de la température durant le détourage :	41
Introduction :.....	45
3.Caractérisation des surfaces usinées :	46
3.1-Étude de l'intégrité de surface et des défauts résultant du processus de détourage, y compris le délaminage, à l'aide d'un microscope optique :	46
3.1.1- Analyse des dommages superficiels :.....	46
3.1.2- Analyse de la qualité des surfaces par microscope optique :.....	46
3.1.3- Analyse de la température de coupe :.....	52
Conclusion :	55
Références :	57

Liste des symboles

σ : Résistance des fibres (*MPa*)

ρ : Masse volumique (*kg/m*)

E: Module de Yonge (module elasticity) [*MPa*]

ϵ_r : Déformation à la rupture (*mm/mm*)

ρ_f : la masse volumique de fibre (*g/cm³*)

ρ_m : la masse volumique de matrice (*g/cm³*)

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

(FRP) : Fiber-Reinforced Plastic Plastique renforcé de fibres

(NF) : Plastique renforcé de fibres

(ANOVA) : Analyse Of Variance Analyse de variance

(MEB) : Microscope électronique à balayage

(NFRP) : Natural-Fiber-Reinforced Plastic Plastique renforcé par fibres naturelles

(HSS) : Acier Rapide Supérieur

(BFRP) : Banana-Fiber-Reinforced Plastic Plastique renforcé par fibres de banane

(HFRP) : Hemp-Fiber-Reinforced Plastic Plastique renforcé par fibres de chanvre

(JFRP) Jute-Fiber-Reinforced Plastic Plastique renforcé par fibres de jute

(GFRP) : Glass-Fiber-Reinforced Plastic Plastique renforcé par fibres de verre

(Ra) : Retardateur d'Arrachement

(FFRP) : Fibre de Verre Renforcée de Polymère

(PP) : polypropylène

(PE) : le polylactide

(PLA) : époxy

(MOCN) : Commande numérique par ordinateur Commande numérique par ordinateur

Introduction Générale

Introduction générale :

Les composites hybrides représentent une avancée significative dans le domaine des matériaux, en combinant les avantages de différents types de fibres pour créer des matériaux plus performants et durables. En intégrant des fibres naturelles telles que le luffa et le jute dans des matrices polymères, on parvient à développer des matériaux qui non seulement sont respectueux de l'environnement mais également compétitifs en termes de coût et de disponibilité.

Les fibres de luffa et de jute, en particulier, sont des ressources renouvelables abondantes et peu coûteuses. Le luffa est une plante tropicale dont les fibres sont légères, résistantes et biodégradables. Le jute, quant à lui, est l'une des fibres naturelles les plus utilisées au monde, appréciée pour sa robustesse et sa capacité à être cultivée en grandes quantités. Leur intégration dans des matrices polymères permet de réduire la dépendance aux fibres synthétiques, comme la fibre de verre ou de carbone, qui sont plus coûteuses et ont un impact environnemental plus élevé.

Ces composites hybrides offrent une alternative prometteuse aux matériaux traditionnels, notamment dans des applications industrielles exigeantes telles que l'automobile, l'aéronautique, et les biens de consommation. Ils présentent des propriétés mécaniques avantageuses, comme une bonne résistance à la traction et à la flexion, tout en étant plus légers que les matériaux conventionnels. De plus, leur impact environnemental est réduit grâce à la dégradabilité des fibres naturelles et à une empreinte carbone moindre durant leur production.

Cependant, malgré ces nombreux avantages, l'optimisation de la fabrication et des propriétés des composites hybrides à base de fibres naturelles reste un défi. L'un des principaux défis est la variabilité des propriétés des fibres naturelles, qui peut influencer la qualité et la performance des composites. De plus, les interactions entre les fibres naturelles et la matrice polymère doivent être soigneusement contrôlées pour assurer une bonne adhésion et une distribution uniforme des charges mécaniques.

Pour répondre aux exigences spécifiques des applications industrielles, il est crucial de comprendre et de maîtriser le comportement de ces matériaux durant le processus d'usinage. L'usinage des composites hybrides doit être optimisé pour minimiser l'usure des outils, maximiser la qualité de surface, et garantir des tolérances dimensionnelles précises. Cela nécessite une connaissance approfondie des paramètres d'usinage optimaux, des géométries d'outil appropriées, et des techniques de refroidissement et de lubrification efficaces.

Contexte

Les composites hybrides à base de fibres naturelles comme le luffa et le jute jouent un rôle crucial dans le développement de matériaux durables et performants. Leur utilisation permet de réduire l'empreinte carbone et de proposer une alternative prometteuse aux matériaux synthétiques traditionnels. La disponibilité abondante de ces fibres, combinée à leur faible coût, en fait des candidats idéaux pour diverses applications industrielles. Toutefois, pour que ces matériaux soient adoptés à grande échelle, il est nécessaire d'optimiser leurs propriétés mécaniques et leur processus de fabrication.

Un aspect essentiel de cette optimisation réside dans l'usinabilité de ces composites. L'usinage, qui inclut des opérations telles que le fraisage, le perçage et le tournage, est crucial pour la fabrication de pièces aux dimensions précises et aux surfaces de haute qualité. Les défis majeurs résident dans la compréhension des interactions entre les fibres et la matrice polymère, ainsi que dans l'optimisation des paramètres d'usinage pour garantir une performance maximale des composants fabriqués à partir de ces composites. Une maîtrise approfondie des paramètres d'usinage, des géométries d'outils et des conditions de coupe est indispensable pour minimiser l'usure des outils, améliorer la qualité des surfaces usinées et assurer la durabilité des pièces en composite.

Problématique

L'usinage des composites hybrides luffa/jute présente plusieurs défis cruciaux pour leur adoption industrielle, car ces matériaux peuvent être sujets à divers défauts pendant le processus d'usinage. L'arrachement des fibres, le délaminage, la dégradation de la matrice, et le peluchage sont des phénomènes courants qui peuvent avoir des conséquences significatives sur la performance et la durabilité des pièces finies. Par exemple, l'arrachement des fibres entraîne des surfaces rugueuses et affaiblit les zones usinées, réduisant ainsi la résistance mécanique de la pièce. Le délaminage, causé par des forces de cisaillement excessives ou des vibrations, compromet gravement l'intégrité structurelle du composite, diminuant sa capacité à supporter des charges et augmentant le risque de défaillance en service. La dégradation de la matrice, due à la chaleur et aux forces générées lors de l'usinage, réduit la cohésion entre les fibres et la matrice, affectant négativement la rigidité et la résistance du composite. Enfin, le peluchage, où les fibres se détachent partiellement de la matrice, augmente la friction et l'usure des pièces en mouvement, réduisant leur efficacité et leur durée de vie. Ces défauts d'usinage compromettent

la fiabilité, la longévité et la performance des pièces composites, tout en augmentant les coûts de production et de maintenance. Par conséquent, il est crucial de comprendre comment ces défauts d'usinage se manifestent et de développer des méthodes pour les minimiser, afin de garantir une performance maximale des composants fabriqués à partir de ces matériaux.

Objectifs

L'objectif principal de ce travail est d'analyser le comportement durant l'usinage des composites hybrides luffa/jute, en mettant un accent particulier sur les défauts d'usinage tels que l'arrachement des fibres, le délaminage, la dégradation de la matrice et le peluchage. Plus spécifiquement, il s'agit d'évaluer l'usinabilité de ces composites en fonction de différentes conditions de coupe, de géométries d'outil et de paramètres d'usinage, afin de :

- Comprendre comment les propriétés des composites influencent leur susceptibilité aux défauts d'usinage.
- Identifier les conditions de coupe et les géométries d'outil qui minimisent l'arrachement des fibres et le délaminage.
- Analyser l'impact des paramètres d'usinage sur la dégradation de la matrice polymère et le peluchage des fibres.
- Proposer des pratiques optimales pour réduire les défauts d'usinage et améliorer la qualité des surfaces usinées.

Ces objectifs visent à fournir une compréhension approfondie des interactions entre les fibres naturelles et les opérations d'usinage, permettant ainsi de proposer des solutions concrètes pour améliorer la performance des composites hybrides dans des contextes industriels variés.

CHAPITRE 1 :
REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Généralités sur les composites et leurs constituants :

- Les composites représentent des matériaux complexes, composés de deux phases distinctes : la matrice et les renforts, qui ne se mélangent pas. Dans ce mémoire, la matrice est constituée d'une résine époxyde, tandis que les renforts se présentent sous forme de fibres longues, telles que le luffa ou le jute. La matrice assure la cohésion de la structure et permet une répartition uniforme ainsi qu'un transfert, par cisaillement, des sollicitations mécaniques subies par celle-ci[1]. Cette cohésion garantie par la matrice contribue à la stabilité dimensionnelle du composite. Les renforts, quant à eux, confèrent la rigidité mécanique[2] et la résistance de la structure, agissant comme une armature qui supporte la majeure partie des contraintes mécaniques. Ainsi, le matériau composite formé présente des performances supérieures à celles de ses constituants individuels[1], combinant les avantages de la matrice en polymère, tels que la facilité de mise en œuvre, la productivité élevée et la réduction des coûts[3], avec ceux des fibres, notamment la rigidité, la dureté et la résistance élevée. Par conséquent, en raison de leur large champ d'application, les composites à fibres renforcées (FRP) attirent un marché international de plusieurs milliards de dollars.

Le choix de la résine et du renfort, en particulier pour les fibres naturelles (NF), est dicté par le domaine d'application visé pour l'utilisation du matériau composite[2]. En effet, chaque type de fibre naturelle possède ses propres propriétés intrinsèques, qui peuvent varier en fonction de divers facteurs tels que leur milieu de culture, leur âge, leur méthode d'extraction, etc. De plus, ces caractéristiques peuvent différer même au sein d'un même type de fibre, selon leur origine végétale. Une revue de la littérature sur les différentes phases d'un composite sera présentée par la suite. Cette étude se concentrera spécifiquement sur les fibres naturelles d'origine agricole, en particulier les fibres de lin, ainsi que sur les fibres synthétiques de verre.

1.1.1 Les matrices :

-Les matrices se regroupent en trois catégories distinctes : les matrices métalliques comprenant des matériaux tels que l'aluminium, le magnésium et le cobalt, les matrices céramiques, et les matrices organiques ou polymériques, parmi lesquelles on trouve l'époxyde, le polycarbonate et le polyvinylchloride.

-Parmi ces types de matrices, celles en polymère sont les plus couramment utilisées. Elles peuvent être classées en thermoplastiques (telles que le polyamide, le PEEK, le PVC, le polypropylène, etc.), thermodurcissables (comme l'époxy, le polyester, la mélamine, etc.), ou encore élastomères. Les polymères thermoplastiques se caractérisent par leur structure linéaire, organisée en chaînes moléculaires flexibles. Bien qu'ils présentent une faible résistance et un module faible (voir Tableau 1.1), ils sont hautement ductiles et solides[2]. Les températures maximales de transformation des composites à matrice thermoplastique étant relativement basses (généralement proches de la température ambiante), la matrice peut subir un ramollissement lors de l'usinage en raison de la chaleur générée par le frottement entre l'outil et le matériau. Ensuite, elle peut se décomposer ou se dégrader chimiquement à des températures relativement basses, allant de 65°C à 100°C dans le cas du polyamide[4]. De plus, la mise en forme de ces polymères est réversible.

*Tableau 1.1: Propriétés mécaniques et thermiques de quelques résines thermoplastiques
Adapté de [2]*

<i>Resine</i>	T_f (°C)	ρ (kg/m ³)	σ_t^R (MPa)	E (GPa)
<i>Polyamide</i>	65 à 100	1140	60 à 85	1,2 à 2,5
<i>Polypropylene</i>	900	1200	20 à 35	1,1 à 1,4

-Les polymères thermodurcissables adoptent une structure en réseaux tridimensionnels hautement ramifiés et réticulés. Leur résistance mécanique est notable, comme indiqué dans le Tableau 1.2. Ces polymères se caractérisent par leur rigidité, limitant ainsi leur ductilité, et par leur résistance chimique et leur stabilité thermique, les préservant de la fusion sous l'effet de la chaleur. En effet, leur température de transition vitreuse, notamment pour l'époxy, avoisine les

190°C. Dans les composites, ils permettent une plus grande flexibilité quant à la configuration structurale des fibres. Cependant, leur mise en forme est irréversible [5].

*Tableau 1.2 : Propriétés mécaniques et thermiques de quelques résines thermodurcissables
Tiré de [2]*

Résine	T_f (°C)	ρ (kg/m ³)	ϵ_t^R (%)	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
<i>Polyesters</i>	60 à 100	1140	2-5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
<i>Phénoliques</i>	120	1200	2,5	40	250	3 à 5
<i>Epoxydes</i>	290	1100 à 1500	2-5	60 à 80	250	3 à 5

La résine époxy figure parmi les matrices thermodurcissables les plus répandues. Elle se distingue par ses excellentes propriétés mécaniques et thermiques, notamment sa facilité de traitement, sa bonne adhérence aux fibres et sa faible absorption d'humidité. Comparativement à d'autres polymères, elle affiche des performances supérieures sur les plans mécanique, chimique et électrique, ce qui en fait l'un des choix privilégiés pour les composites [6].

-Les propriétés intrinsèques des matrices polymères, qu'elles soient thermoplastiques ou thermodurcissables, sont souvent considérées comme médiocres en comparaison avec les matériaux conventionnels. Pour pallier cette limitation, l'incorporation d'un renforcement tel que les fibres naturelles (NF) s'est avérée être une solution prometteuse [7, 8].

1.1.2 Les renforts :

-Les renforts peuvent être classés en deux catégories selon leur origine :

1. Renforts inorganiques :

- Comme l'amiante et le mica.
- Fibres synthétiques telles que le carbone et le verre.
- Fibres métalliques telles que les fibres de bore et le béryllium.

2. Renforts organiques :

- Comportant les fibres naturelles d'origine animale (protéine) ou végétale.
 - Fibres polymériques telles que le kevlar, les polyesters et les aramides[9].
- Les renforts sont disponibles dans différentes formes et structures, notamment :
- Particules (renforcement par dispersion).
 - Fibres :
 - Courtes/discontinues, alignées ou orientées aléatoirement, de longueur inférieure à 100 fois le diamètre de la fibre.
 - Longues/continues, alignées de manière unidirectionnelle ou bidirectionnelle.
 - Structures stratifiées ou en sandwiches :
 - Les stratifiés sont des empilements de plusieurs monocouches et peuvent se présenter sous forme de tissage multiaxial, de tressage ou sous forme d'assemblage tridimensionnel[7].

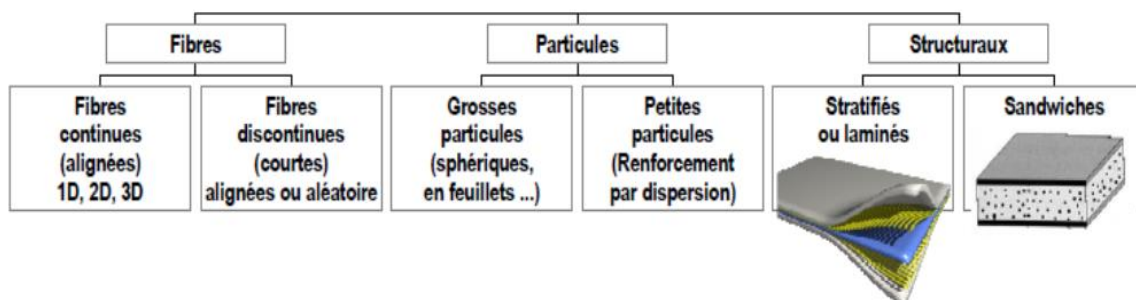
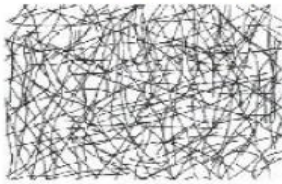


Figure 1.1: Classification des renforts suivant leurs structures[2]

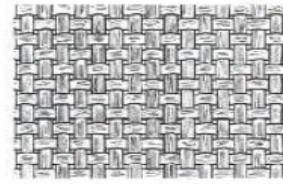
Fibres courtes orientées de façon aléatoire: mat



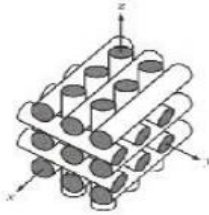
Fibres longues alignées: unidirectionnel



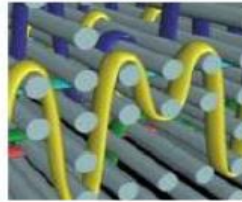
Tissage 2D: bidirectionnel (tricot ou tressage)



En développement: structures 3D



Tissage 3D



Structures NCS

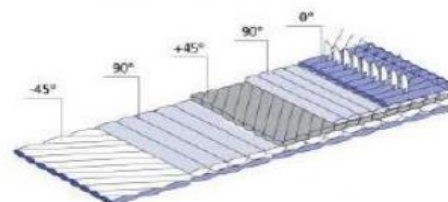


Figure 1.2: Quelques structures géométriques des renforts [2.3]

1.1.2.1 Les fibres naturelles :

Bien que l'utilisation des fibres naturelles comme renforcement pour les composites soit un phénomène récent, ces dernières ont été exploitées par l'homme depuis la préhistoire [10, 11].

Les fibres naturelles peuvent provenir de trois sources différentes, à savoir végétale, animale et minérale (voir Figure 1.3). Les fibres végétales présentent l'avantage d'avoir des propriétés mécaniques satisfaisantes et une densité apparente réduite. [7] les classifient en quatre catégories selon leurs origines (voir Figure 1.3) :

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

mentionnent deux autres catégories, à savoir les fibres de roseaux et d'herbe, ainsi que les fibres extraites des racines et du bois[6].

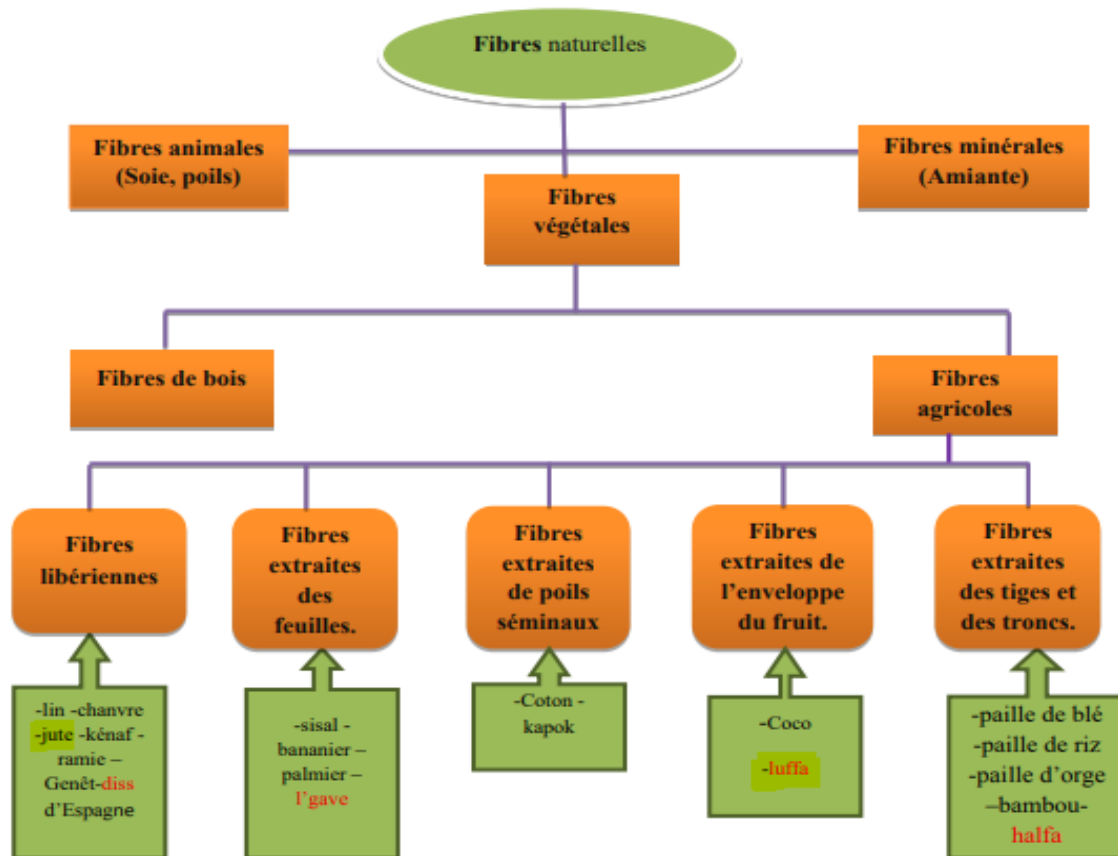


Figure 1.3: Classification des fibres naturelles suivant leurs origines Adaptée de [2 .3] et [14]

Les fibres naturelles d'origine végétale se composent principalement de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et de pectine. La cellulose représente le principal composant de la fibre, atteignant jusqu'à 80% du volume. Elle joue un rôle crucial dans ses propriétés mécaniques, étant présente sous forme cristalline dans les microfibrilles des fibres, et constituant ainsi l'élément organique le plus solide et résistant de la structure fibreuse. L'hémicellulose, quant à elle, est hydrophile, ce qui rend la fibre sensible à l'humidité et favorise la biodégradation, bien qu'elle accentue également la dégradation thermique. La lignine, en revanche, renforce la dureté et la rigidité de la cellule, possédant une résistance élevée à la décomposition. Contrairement à l'hémicellulose, la lignine est stable thermiquement et résistante à l'eau [5]. Ainsi, les fibres naturelles sont considérées comme des composites, avec la lignine, l'hémicellulose et la pectine formant la matrice amorphe de la fibre, tandis que les fibrilles celluloses agissent en tant que renforts.

Le cœur de la fibre est creux, formant ce qu'on appelle le lumen, permettant la circulation de l'eau et des substances nutritives dans la plante grâce à une action capillaire, ce qui peut entraîner l'absorption et la rétention de l'humidité interne [12] (voir figure 1.4). Par conséquent, les fibres naturelles sont hautement hydrophiles, leur sensibilité à l'humidité entraînant une diminution des propriétés mécaniques proportionnelle au taux d'humidité absorbée. Ces fibres sont donc peu compatibles avec les thermoplastiques hydrophobes [3] .

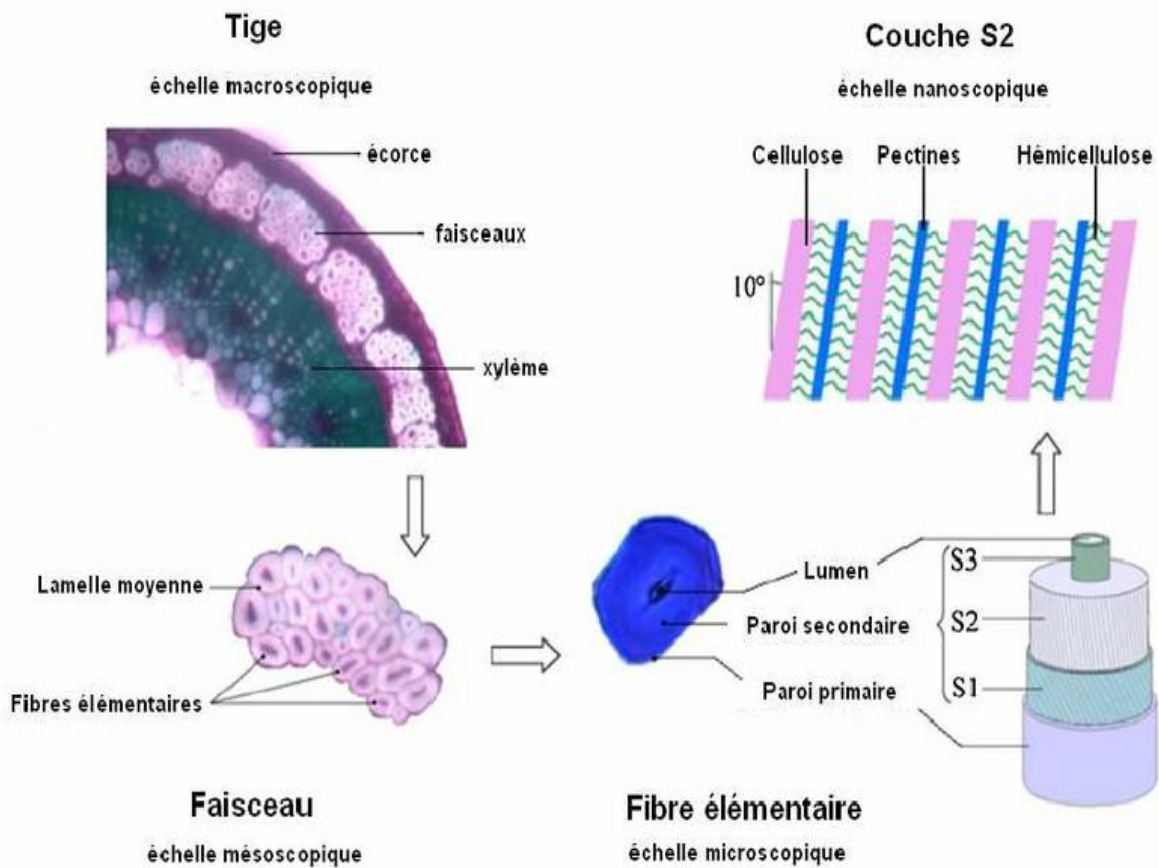


Figure 1.4: Composition de la fibre naturelle élémentaire Tirée de [14]

-Les fibres extraites des feuilles et celles des tiges, telles que le jute et le luffa, représentent parmi les plus utilisées. En effet, les fibres naturelles les plus efficaces sont souvent celles qui sont les plus riches en cellulose. Cependant, leurs propriétés varient considérablement en fonction de divers facteurs tels que l'origine de la plante, la qualité et l'âge de la fibre, la localisation de la plantation, la taille de la fibre et la méthode d'extraction. De plus, la structure même de la fibre évolue le long de sa longueur. Par exemple, le diamètre de la fibre est généralement plus important près de la racine et diminue progressivement vers la pointe, selon les recherches [13]. Cette variation géométrique induit une non-uniformité des propriétés mécaniques le long de la fibre, ce qui peut être une contrainte lors de son utilisation dans le renforcement des matériaux composites.

-Une autre limitation majeure à prendre en compte lors du renforcement des polymères avec des fibres naturelles est leur sensibilité à la température. En effet, ces fibres commencent à se dégrader à des températures relativement basses, généralement entre 200 et 230°C, comme indiqué par [14]. Il est donc impératif de ne pas dépasser ces seuils de température lors du processus de fabrication ou de l'utilisation des matériaux composites renforcés avec ces fibres, afin d'éviter une détérioration prématurée de leurs propriétés mécaniques.

Les propriétés des fibres de luffa et de jute et leurs applications :

Luffa (*Luffa cylindrica*) :

- La Luffa, une courge végétale originaire des pays orientaux, offre des fibres séchées dotées de remarquables propriétés absorbantes. Voici ses caractéristiques :

- Entièrement naturelle, biodégradable et non toxique pour la santé.

- Capacité à absorber liquides et odeurs.

- Ressource renouvelable.

Après une maturation de 9 mois, la Luffa est récoltée, lavée et séchée. Les fibres ainsi obtenues servent à la fabrication de poudres et de farines hautement absorbantes[15].

Surnommée également éponge végétale ou Loofah, la Luffa orne de manière originale les tonnelles ou les clôtures. Les fruits verts allongés, comestibles lorsqu'ils sont jeunes, développent par la suite une texture fibreuse utilisée pour confectionner des éponges.

La Luffa est une plante fibreuse non comestible, dont l'intérieur est constitué de fibres résistantes entrelacées en un réseau dense. Doux, flexible, hydrophile et durable, le luffa est réputé pour ses qualités absorbantes exceptionnelles[16].

Une entreprise canadienne a développé au cours des dix dernières années un savoir-faire unique dans la transformation de ces fibres végétales. Elle propose désormais cette nouvelle matière en tant qu'alternative aux fabricants de produits absorbants[16].

Les fibres de Luffa sont un réseau interconnecté composé principalement de cellulose (66%), d'hémicellulose (17%) et de lignine (15%)[17], formant des microcanaux avec un diamètre de 10 à 20 μm et des macropores pouvant atteindre 800 μm [18]. Leur porosité varie entre 79 et 93%, avec une densité de 0,02 à 0,04 g/cm^3 et un volume poreux spécifique de 21 à 29 cm^3/g . La Luffa cylindrica démontre sa stabilité en tant que matériau pouvant être utilisé en biotransformation, même après des cycles d'autoclavage à 120°C pendant 20 minutes[19]. Par conséquent, le fruit sec de Luffa cylindrica a été étudié ces dernières années pour l'immobilisation de divers types de cellules[20].



Figure 1.7: Larbert de luffa



Figure 1.6: Les grains de luffa



Figure 1.5: Coupe transversale de fruits de luffa

Jute :

- Le jute est une fibre végétale dont la longueur peut varier de 150 à 300 cm, avec un diamètre compris entre 0,015 et 0,002 mm. Il est disponible dans une gamme de couleurs allant du blanc au jaune, en passant par le marron et le gris. La fibre de jute présente une résistance de 3,5 à 5 g/den et une gravité spécifique de 1,48. Sa capacité de récupération d'humidité est d'environ 13,75%. En termes d'élasticité, elle a une extension de rupture de 1,8% avec une récupération élastique très faible. La composition chimique du jute comprend principalement plus de 65% de cellulose, plus de 22,5% d'hémi-cellulose et plus de 11% de lignine.

La fibre de jute est extraite des vaisseaux de phloème situés sous l'écorce de la tige principale de la plante. Ces fibres sont longues, douces et brillantes, avec une longueur allant de 1 à 4 mètres et un diamètre de 17 à 20 microns. La fibre de jute est essentiellement constituée de cellulose végétale et de lignine, qui sont respectivement les principaux composants des fibres végétales et de bois. Pour séparer les fibres de la tige, les méthodes de rouissage peuvent être biologiques ou chimiques, bien que les premières soient plus courantes en raison du coût des produits chimiques. Le rouissage biologique comprend diverses techniques telles que le regroupement des tiges en faisceaux avant de les faire tremper, facilitant ainsi l'extraction des fibres.

La fibre de jute est souvent surnommée "fibre d'or" en raison de ses reflets brillants. Il s'agit d'une culture annuelle qui prend environ 120 jours pour atteindre sa maturité. Sa biodégradabilité élevée en fait un choix écologique pour de nombreuses applications, tandis que sa brillance et sa douceur en font un matériau attrayant pour une variété d'utilisations textiles et industrielles[21, 22].



Figure 1.9: Plante de jute



Figure 1.8: tissu de jute

Application des composites à fibres naturelles :

Les matériaux composites à base de fibres naturelles trouvent une large application dans divers domaines du quotidien, notamment l'automobile, la construction, l'aérospatiale, le transport et le sport [7](voir tableau). Pour répondre aux impératifs économiques et environnementaux, le projet ECOSHELL, financé par l'Union européenne, vise à remplacer les fibres synthétiques non renouvelables utilisées dans la structure des automobiles par des biocomposites [23]. Ces matériaux jouent également un rôle essentiel dans la fabrication de pièces non structurales pour les véhicules, telles que les garnitures de portières, les dossiers de siège et les habillages de coffre.

Les composites à matrice de polyester conviennent à la fabrication de coques de bateaux, de panneaux structuraux, de panneaux de construction, de poutres, d'appareils électriques, de réservoirs d'eau et de récipients sous pression, entre autres. Par ailleurs, les résines époxydes présentent un retrait moindre après durcissement, garantissant une meilleure précision dimensionnelle [4] .

Tableau 1.3: Domaines d'application des composites à fibres naturelles Tiré de [2 .3]

<i>Domaine d'application</i>	<i>Part de marché</i>
<i>Bâtiment</i>	30%
<i>Industrie automobile</i>	25%
<i>Équipements industriels</i>	10%
<i>Électronique</i>	9%
<i>Sport</i>	8%
<i>Construction navale et industrie de l'acier</i>	6%
<i>Génie électrique</i>	6%
<i>Aéronautique et aérospatial</i>	3%
<i>Chemin de fer</i>	1%
<i>Éoliennes</i>	1%
<i>Médecine</i>	1%

Revue des méthodes d'usinage des composites hybrides :

-Les méthodes conventionnelles d'usinage, telles que le tournage, le fraisage et le perçage, sont largement employées pour façonner les matériaux composites en raison de la disponibilité des équipements et de la familiarité établie avec ces techniques standard, soutenues par des normes établies. Cependant, il est crucial de noter que l'usinage traditionnel des composites diffère considérablement de celui appliqué aux matériaux métalliques en raison de la nature non homogène des composites et de l'intégration de fibres extrêmement abrasives. Ces caractéristiques rendent les composites difficiles à usiner, posant ainsi des défis spécifiques aux opérations de découpe[4, 24].

Contrairement aux métaux, où le processus de coupe implique une déformation plastique suivie de l'arrachement progressif de matière, le mécanisme de coupe des matériaux composites est nettement plus complexe. Pendant la phase de découpe des composites, l'outil entre en contact de manière intermittente avec deux composants distincts : la résine, souvent caractérisée par sa ductilité (la coupe résulte d'une déformation plastique), tandis que les fibres sont beaucoup plus rigides (la coupe se produit par rupture fragile)[25].

La méthode de découpe des composites varie en fonction de l'orientation des fibres, comme l'a démontré l'étude de Ramulu (1997)[26]. De plus, les recherches menées par Li et ses collègues (2016)[27] ont révélé que l'orientation des fibres, la géométrie de l'outil et les conditions de coupe influent sur le mécanisme de découpe. Ils ont identifié différents modes de découpe en fonction des orientations spécifiques des fibres. Par exemple, pour les stratifiés où les fibres sont alignées à un angle de 0° par rapport à la direction de l'outil, les auteurs ont noté que le copeau résulte d'une séparation (Mode I) le long de l'interface fibre/matrice, accompagnée d'une contrainte de cisaillement (Mode II) générée par l'avancement de l'outil. La rupture se produit perpendiculairement à l'axe d'avancement de l'outil, sous l'effet d'une contrainte de flexion locale. Pour les fibres orientées dans une plage de 15° à 75° , la formation du copeau est attribuée à un cisaillement provoqué par une compression perpendiculaire à l'axe des fibres, associé à une contrainte de cisaillement (Mode II) le long de l'interface fibre/matrice. Cette tendance est généralement observée pour toutes les orientations positives des fibres.

L'élimination de matériau est grandement influencée par les propriétés du matériau unidirectionnel dans le plan de cisaillement. Lorsque les fibres sont disposées à un angle supérieur à 75° (orientations négatives), la défaillance découle d'une compression

perpendiculaire aux fibres, accompagnée d'un cisaillement le long de l'interface fibre/matrice. Ce type de défaillance peut entraîner la formation de fissures entre les différentes couches du matériau composite, l'arrachement des fibres et une déformation par flexion des fibres (voir Figure 1.5)[27].

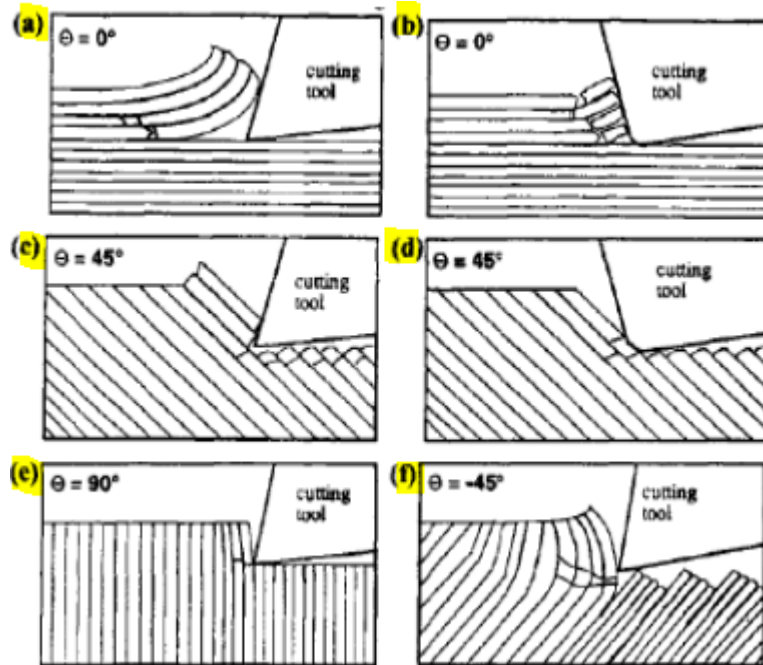


Figure 1.10: Mécanisme de coupe de détourage orthogonale en fonction de l'orientation de plis Unidirectionnels [2].

L'usinage demeure une solution fréquemment privilégiée pour façonner les matériaux composites et obtenir des produits finis conformes aux formes souhaitées. Cependant, ce processus peut présenter des défis notables. La complexité de l'usinage des matériaux composites réside dans la nécessité de recourir à plusieurs opérations distinctes, telles que le détourage, le contournage ou le perçage, avant d'assembler les pièces pour former une structure finale[28].

Outre les méthodes conventionnelles, divers procédés non traditionnels gagnent en popularité. Parmi eux, on retrouve notamment le jet d'eau haute pression et la découpe laser. Ces techniques offrent des avantages spécifiques, comme une précision accrue ou la capacité à travailler avec des matériaux sensibles à la chaleur, ce qui peut être crucial dans le domaine des composites.

En somme, bien que l'usinage demeure un pilier dans la fabrication de produits composites, l'éventail des options s'élargit avec l'introduction de procédés novateurs, offrant ainsi aux

fabricants une gamme étendue de choix pour répondre aux exigences spécifiques de chaque projet[28].

- Les structures aéronautiques requièrent généralement l'assemblage de composants à l'aide de fixations telles que des rivets ou des vis, insérées dans des trous percés au moyen d'un processus de perçage. Le nombre de trous nécessaire pour une structure d'aéronef est considérable, pouvant varier de plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions, selon la taille de l'appareil [29-39]. À titre d'exemple, sur l'AIRBUS A380 et le FALCON DASSAULT F7X, environ 2 000 000 et 20 000 trous doivent être réalisés respectivement, avec une répartition d'environ 70 % dans la structure en aluminium, 25 % dans la structure composite, et les 5 % restants dans la structure en titane[40] . Ainsi, le perçage des trous devient l'opération d'usinage la plus sollicitée dans l'industrie aéronautique.

- D'autre part, le détourage des pièces composites constitue le processus principal et indispensable pour éliminer les matériaux excédentaires après le démoulage, afin d'atteindre les spécifications dimensionnelles finales [41-44]. En d'autres termes, le détourage vise à éliminer les bords non conformes et non homogènes des pièces (Fig1.6), permettant ainsi d'obtenir des formes et des dimensions en accord avec les exigences des spécifications. De plus, l'usinage de surface revêt une importance capitale lors de la préparation des surfaces en vue de l'assemblage par collage pour des applications multi-matériaux. Cette opération peut être réalisée de plusieurs façons, notamment par usinage conventionnel (enlèvement par coupe ou scie diamantée) ou par usinage non conventionnel, tel que l'utilisation d'un jet d'eau abrasif haute pression (enlèvement de matériau par érosion). Toutefois, l'hétérogénéité et l'anisotropie des matériaux composites affectent leur usinabilité par rapport à celle des matériaux homogènes et isotropes.

- Quel que soit le processus d'usinage utilisé (conventionnel ou non conventionnel), l'enlèvement de matériau est souvent accompagné de divers types de dommages. Face à ces dommages, garantir le respect des critères industriels de qualité d'usinage, souvent établis pour des matériaux homogènes, devient une tâche ardue, voire impossible. Malgré les défis rencontrés, le détourage et le perçage des matériaux composites demeurent des opérations très complexes pour la communauté moderne de la fabrication [33, 41-47]. Cependant, l'évolution constante des propriétés de ces matériaux nécessite aujourd'hui une maîtrise accrue de leurs techniques d'usinage et une amélioration continue de leurs performances.

Procédé de perçage :

-Le perçage représente l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour assembler des structures composites. Comme illustré dans la Figure 1.7, les principaux problèmes de qualité associés au perçage incluent le délaminage, le déchaussement des fibres et la fissuration en surface du trou. Parmi ceux-ci, le délaminage est considéré comme le plus critique en termes d'endommagement. Pour remédier à ces défauts, qui ont un impact significatif sur les propriétés mécaniques du matériau et réduisent considérablement la durée de vie des structures percées, il est essentiel de développer des procédures visant à optimiser les conditions d'usinage (telles que la géométrie de l'outil, les paramètres de coupe et la stratégie d'usinage). Cela peut être réalisé en identifiant et en comprenant les facteurs les plus influents lors du processus de perçage des composites[48].

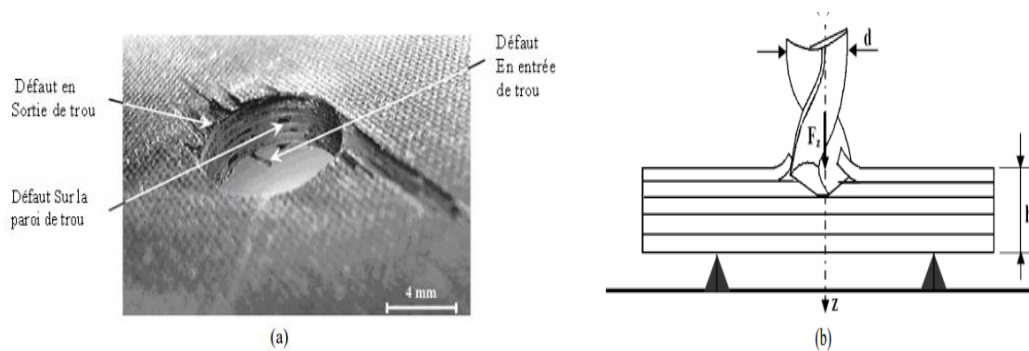


Figure 1.11: Procédé de perçage. (a) localisation des principaux défauts générés lors du perçage des composites en carbone/époxy (b) schématisation d'un défaut en entrée du trou adapté par [48]

- Certains travaux portent sur l'opération de perçage de composites fabriqués avec une résine polymère et renforcés avec des fibres végétales, telles que les fibres de banane [49, 50], de sisal [49, 51], de palmier-dattier [52], de hibiscus [49], de chanvre [53], de bambou [54], de jute [55, 56] et de coco [57, 58], tandis que d'autres travaux comparent le perçage de composites NFRP et de verre [59, 60]. En ce qui concerne les outils de coupe, les forets les plus couramment utilisés sont des forets hélicoïdaux standards fabriqués soit en acier rapide (HSS) [49-51, 55, 58], soit en carbure de tungstène [56, 57]. L'angle de pointe du foret est généralement de 118° . D'autres types d'outils sont également testés pour le perçage de composites NFRP, tels que le

foret de type Brad pour le carbure de tungstène [60] ou un foret en HSS ayant 2 arêtes de coupe [51]. Dans la plupart de ces études, le diamètre des outils varie entre 3 et 14 mm.

-La sélection des paramètres d'usinage affecte les performances de perçage. Les principaux paramètres d'entrée du perçage ont souvent été la géométrie et le matériau du trou de perçage, le diamètre de l'outil, la vitesse de coupe et la vitesse d'avance [61-64]. L'analyse de la variance (ANOVA) réalisée dans les travaux susmentionnés montre que la vitesse d'avance contribue le plus à l'évolution des forces de coupe et du taux de délamination, suivie par le diamètre de l'outil, puis la vitesse de coupe [49, 54]. Les modèles analytiques choisis pour prédire le taux de délamination ainsi que les forces de coupe sont des régressions linéaires multiples avec des effets d'interaction.

-La figure 1.8 montre les photographies au microscope électronique à balayage (MEB) de la surface interne d'un trou percé dans des composites de polyester renforcés de fibres de noix de coco avec délamination maximale [65]. Une surface murale non uniforme et un arrachage des fibres dû à l'action de coupe ont été observés (Fig1.8).

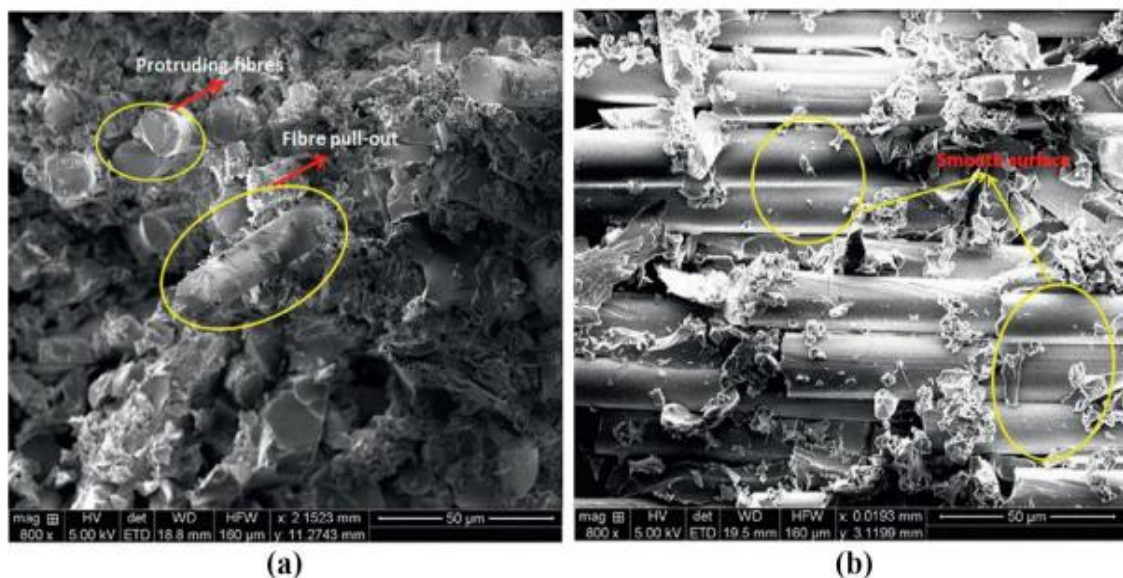


Figure 1.12: Photographies MEB de la surface intérieure d'un trou percé en composites polyester renforcés de fibres de coco: a fibres saillantes et extraction de fibres, b surface lisse, reproduite depuis [65]

Procédé de fraisage de profilé (détourage) :

Dans le domaine du fraisage, deux opérations prédominent dans les applications industrielles : le détourage, également appelé fraisage de profilé, et le contournage. Le détourage est fréquemment utilisé pour ébarber les pièces brutes de moulage. Son principe est illustré par la Figure 1.9. Lors du détourage, l'objectif est d'ajuster les dimensions de la pièce conformément aux spécifications du dessin technique. Cette opération de fraisage s'effectue sur toute l'épaisseur de la pièce.

Quant au fraisage par contournage, il génère des copeaux en forme de croissant à chaque passage des arêtes de coupe, comme représenté dans la Figure 1.10. Selon que la fraise attaque le copeau par son épaisseur minimale ou maximale, on parle respectivement de fraisage en opposition ou en concordance (également connu sous le nom de fraisage avalant).

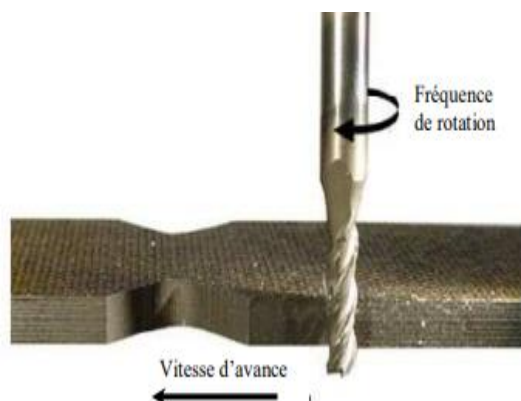


Figure 1.14: Opération de détourage (fraisage de profilé)

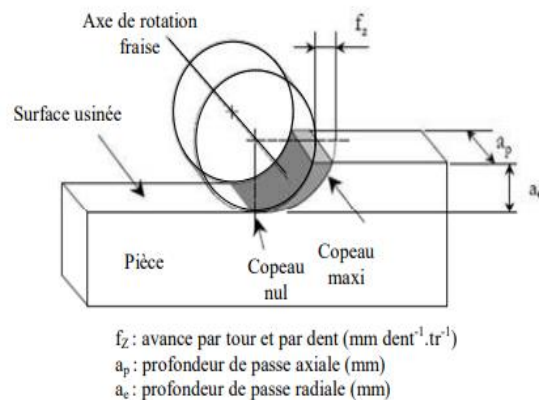


Figure 1.13: Opération de contournage.

Concernant le processus de fraisage des composites renforcés de fibres naturelles (NFRP), beaucoup moins d'études sont disponibles dans la littérature[43, 66-71]. Vinayagamoorthy et al. ont utilisé une fraise hélicoïdale en acier rapide (HSS) à 4 dents d'un diamètre de 7 mm [66] pour rainurer des échantillons de fibres de jute. [67] Babu et al. ont comparé la machinabilité de trois NFRP unidirectionnels différents (fibres de bananier/polyester (BFRP), fibres de chanvre/polyester (HFRP) et fibres de jute/polyester (JFRP)) avec un composite verre/polyester (GFRP) pour l'opération de finition. L'objectif était d'évaluer l'influence de la vitesse de coupe et de l'avance, à une profondeur de coupe constante, sur le facteur de délamination ainsi que sur

la rugosité de la surface finie obtenue par fraisage à sec à l'aide d'une fraise en carbure brasée. Les résultats confirment la littérature présentée par Teti [4] et montrent que le facteur de délamination et la rugosité arithmétique (R_a) de la pièce finie diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe et augmentent avec l'avance. Ces deux paramètres exercent la plus grande influence sur la délamination et la rugosité de surface. De plus, la contribution de l'avance est 2 à 3 fois supérieure à celle de la vitesse de coupe. Dans le même contexte, Slamani et al.[43]. ont mené une évaluation comparative expérimentale de la qualité d'usinage des composites polymères renforcés de fibres de luffa/jute (FFRP) et de verre (GFRP) lors de l'opération de finition des bords en utilisant deux outils de coupe différents. Ils ont constaté que les fraises en carbure non revêtues à deux dents fonctionnent mieux avec le FFRP, tandis que les fraises à deux dents en diamant polycristallin sont plus adaptées pour l'usinage des bords en GFRP.

Delahaigue et al. [72]Se sont intéressés au processus de finition des composites époxydes renforcés de fibres de lin unidirectionnelles et bidirectionnelles. Ils confirment la bonne usinabilité de ce matériau. Aucune usure d'outil n'a été observée, ce qui prouve le caractère non abrasif des fibres de luffa/jute. Cependant, en raison de la nature viscoélastique des fibres de luffa /jute, la finition de ce matériau entraîne une mauvaise qualité de surface et finalement, un grand nombre de fibres non coupées et un facteur de délamination élevé. De plus, la combustion de la matrice et des fibres peut survenir lors de l'usinage à sec des NFRP dans certaines conditions[68].

Le modèle de Merchant [73] a été appliqué pour évaluer l'effet de l'orientation des fibres sur l'usinabilité des composites NFRP. Ils ont trouvé que l'angle d'orientation des fibres affecte significativement les énergies de cisaillement et de friction. L'orientation des fibres à 45° offre la meilleure usinabilité, à 90° génère l'énergie de coupe la plus élevée, tandis qu'à 0° induit la plus grande rugosité de surface. Ils ont également constaté que le comportement de coupe des fibres végétales et de la matrice polymère qui constituent les matériaux composites est indépendant de la nature de la matrice polymère, c'est-à-dire thermodurcissable ou thermoplastique[74].

CHAPITRE 2 :

Matériel et Méthodes

Introduction :

La section "Matériel et Méthodes" de ce mémoire détaille les procédures expérimentales utilisées pour élaborer les composites hybrides luffa/jute et pour étudier le processus de détourage de ces composites. L'élaboration de composites hybrides nécessite une sélection minutieuse des matrices polymères et des techniques de fabrication appropriées pour assurer des propriétés mécaniques optimales. De même, l'étude du détourage exige une approche méthodique pour minimiser les défauts de surface et garantir une intégrité structurelle adéquate des composites.

Dans cette section, nous décrirons en détail les étapes suivies pour élaborer les composites hybrides, notamment le choix des matériaux, la préparation des mélanges fibre-matrice, et les procédés de fabrication. Nous aborderons également les méthodes utilisées pour étudier le détourage des composites, y compris les équipements utilisés, les paramètres d'usinage, et les techniques de mesure de la température.

L'objectif principal de cette section est de fournir un aperçu complet des techniques expérimentales utilisées dans cette étude, afin de garantir la reproductibilité des résultats et de faciliter la compréhension des lecteurs. Les informations présentées ici serviront de base pour l'analyse des données et l'interprétation des résultats obtenus dans les sections suivantes de ce mémoire.

2.1-Élaboration des composites hybrides :

2.1.1-Sélection des matrices polymères et des procédés de fabrication adaptés :

-Le choix des matrices polymères et des procédés de fabrication pour les composites hybrides de luffa et de jute dépend de plusieurs facteurs, notamment les propriétés désirées du matériau final, les contraintes d'application et les ressources disponibles. Voici quelques considérations générales :

2.1.1.1. Propriétés des matériaux de renfort :

- Le luffa et le jute sont des fibres naturelles avec des propriétés différentes en termes de résistance mécanique, de rigidité, d'absorption d'eau, etc.

- Le luffa est généralement plus rigide et plus résistant que le jute, tandis que le jute peut avoir de meilleures propriétés d'absorption d'eau.

- Le choix de la matrice polymère et du processus de fabrication doit compenser les différences de ces propriétés pour obtenir un composite équilibré.

2.1.1.2. Compatibilité de la matrice polymère :

- Les matrices polymères couramment utilisées pour les composites naturels incluent le polypropylène (PP), le polyéthylène (PE), le polylactide (PLA), l'époxy et le polystyrène (PS).

Il est important de choisir une matrice qui adhère bien aux fibres de luffa et de jute et qui offre une bonne compatibilité chimique pour assurer une bonne adhérence et des propriétés mécaniques optimales.

2.1.1.3. Procédés de fabrication :

- Les composites hybrides peuvent être fabriqués par différents procédés, tels que le moulage par compression, le moulage par injection, le moulage par extrusion, le laminage, etc.

- Le choix du procédé dépendra de la complexité de la géométrie souhaitée, de la production à grande échelle ou en série, des propriétés mécaniques requises, etc.

2.1.1.4. Renfort et distribution de la charge :

- Il est important de s'assurer d'une répartition uniforme des fibres de luffa et de jute dans la matrice pour garantir des propriétés mécaniques homogènes.

- Des traitements de surface des fibres peuvent être nécessaires pour améliorer l'adhérence fibres-matrice et réduire les problèmes de délamination.

2.1.1.5. Propriétés finales du composite :

-Les propriétés finales du composite détermineront son application potentielle. Par exemple, pour un matériau biodégradable, le PLA pourrait être une option appropriée pour la matrice.

-En résumé, le choix des matrices polymères et des procédés de fabrication pour les composites hybrides de luffa et de jute devrait être basé sur une analyse approfondie des propriétés des matériaux, des exigences d'application et des contraintes de fabrication. Des tests expérimentaux et des études de caractérisation sont souvent nécessaires pour optimiser le processus de fabrication et obtenir des composites avec les propriétés désirées.

2.1.2-Technique de fabrication de composites par stratification manuelle (Hand lay-up technique):

2.1.2.1 Préparation du Moule:

Nettoyage:

- Le moule a été soigneusement nettoyé pour éliminer toute saleté, poussière et résidus susceptibles d'affecter la qualité de la surface du composite final.



Figure 2 1: Préparation du moule

Agent démoulant:

- Un agent démoulant, tel que de la cire (Colorado), a été appliqué sur toutes les surfaces du moule en contact avec la résine. Cela a facilité le desserrage du composé une fois durci et a empêché la résine de coller au moule



Figure 2 2: Agents démoulant

2.1.2.2. Préparation des Matériaux:

Fibres:

- Les fibres de luffa et de jute ont été découpées selon les dimensions du moule. Elles ont été taillées en formes spécifiques pour s'adapter à des zones particulières du moule.



Figure 2 3: Fibres de luffa et de jute

Résine:

- Dans cette étape, la résine a été mélangée avec le durcisseur en suivant les proportions et les instructions du fabricant. Le mélange a été homogénéisé pour garantir une polymérisation uniforme.

2.1.2.3. Disposition des Fibres:

Placement des fibres:

- Placez une couche de fibres de jute dans le moule. L'orientation des fibres peut être ajustée selon les propriétés mécaniques souhaitées (par exemple, alignées pour maximiser la résistance à la traction dans une direction donnée).

2.1.2.4- Superposition des Couches:

Couches successives:

-Une deuxième couche de fibres (par exemple, une couche de luffa) a été ajoutée sur la première couche imprégnée de résine. La résine a été appliquée à nouveau et le rouleau débulleur a été utilisé.

Consolidation:

Les couches successives de fibres et de résine ont été ajoutées jusqu'à atteindre l'épaisseur désirée, en utilisant le rouleau débulleur après chaque couche pour assurer une bonne consolidation.



Figure 2 4: Superposition des Couches(luffa/jute) avec la résine

2.1.2.5- Application de la Résine:

Imprégnation:

-La résine a été versée ou appliquée sur les fibres à l'aide d'un pinceau ou d'un rouleau, en veillant à ce que toutes les fibres soient complètement imbibées de résine.

Élimination des bulles:

-Un rouleau débulleur a été utilisé pour éliminer les bulles d'air piégées dans la résine, car ces bulles peuvent affaiblir le composite en créant des points de rupture potentiels.

2.1.2.6. Durcissement:

Cure:

- Le composite a été laissé à durcir. Le temps de durcissement dépendait du type de résine utilisée et des conditions de température et d'humidité. Pour certaines résines, un durcissement à température ambiante était suffisant, tandis que d'autres nécessitaient une cure à chaud dans une étuve pour accélérer le processus.

2.1.2.7. Démoulage:

Retrait du moule:

- Une fois que le composite était entièrement durci, il a été retiré du moule avec précaution. Des outils en plastique ou en bois ont été utilisés pour éviter d'endommager le composite. Le démoulage a été effectué avec précaution. Des outils en plastique ou en bois ont été utilisés pour éviter d'endommager le composite.

2.1.2.8. Finition:

Découpe et ponçage:

- Les bords excédentaires du composite ont été découpés et les surfaces ont été ponçées pour obtenir la forme et la qualité de surface souhaitées. Le ponçage a été effectué avec différents grains de papier de verre, en commençant par un grain grossier et en progressant vers un grain fin pour une finition lisse.

Détails Techniques et Conseils:

Sélection des Matrices Polymères:

- Des résines adaptées aux conditions d'utilisation du composite ont été utilisées. Les résines époxy ont été souvent préférées pour leur résistance mécanique et chimique, mais d'autres résines comme le polyester ou le vinyle ester ont également été utilisées en fonction des besoins spécifiques.

Optimisation des Paramètres:

- Le ratio fibre/résine, la température de cure et la pression de consolidation ont été expérimentés pour optimiser les propriétés du composite. Un ratio optimal a permis d'obtenir un bon équilibre entre rigidité et ténacité.

Sécurité:

- Des équipements de protection individuelle (gants, lunettes de protection, masque) ont été portés pour manipuler les résines et les durcisseurs, car certains composants peuvent être irritants ou toxiques.

Avantages de la Stratification Manuelle:

- **Flexibilité:** Adaptée à la fabrication de pièces de formes complexes et de grande taille.

- **Simplicité:** Ne nécessite pas d'équipements coûteux.
- **Contrôle:** Permet un contrôle précis de l'orientation des fibres et du contenu en résine.

Limitations:

- **Temps de fabrication:** Plus, lent que certaines méthodes automatisées.
- **Qualité:** Peut être sujet à des variations de qualité si le processus n'est pas rigoureusement contrôlé.
- **Résistance:** Les composites fabriqués par stratification manuelle peuvent avoir des propriétés mécaniques inférieures à celles des composites fabriqués par des méthodes de compression ou d'infusion sous vide.

2.2-Étude du détournage des composites hybrides :

2.2.1-Machine utilisée :

- Le dispositif d'usinage décrit ci-dessous est spécialement conçu pour être utilisé avec une machine-outil à commande numérique (MOCN) à trois axes, équipée d'un contrôleur SIEMENS 840D. Voici quelques caractéristiques supplémentaires importantes :



Figure 2 5: le CNC d'usinage (détournage)

1. Gabarit de fixation des éprouvettes : Ce dispositif agit comme un gabarit spécialisé pour maintenir fermement les éprouvettes pendant les tests de détourage, assurant ainsi une position stable et précise des pièces pendant l'usinage.



Figure 2 6: Gabarit pour fixer les échantillons durant l'usinage

-Le gabarit a été pré-rainuré pour permettre le passage de l'outil et assurer une évacuation efficace des copeaux, minimisant ainsi le risque de collision entre l'extrémité de l'outil et le gabarit pendant le processus d'usinage. Les rainures ont été conçues pour guider l'outil et faciliter son mouvement tout en évitant les interférences.

-Les rainures du gabarit sont légèrement plus larges que le diamètre de l'outil de fraisage, avec une largeur de 10,5 mm pour un outil de 10 mm de diamètre. Cette marge de tolérance permet un mouvement fluide de l'outil à travers le gabarit, réduisant ainsi le frottement excessif et assurant une efficacité maximale du processus de fraisage.

-Le sous-ensemble plateau et dispositif d'usinage est solidement fixé sur la table de la machine-outil, garantissant ainsi une stabilité et une précision optimales pendant l'usinage. Cette fixation sécurisée est essentielle pour maintenir l'intégrité du processus d'usinage et assurer des résultats cohérents et de haute qualité.

En résumé, ce dispositif d'usinage offre une solution complète et efficace pour le détourage précis des éprouvettes, en offrant une fixation sécurisée, un guidage précis de l'outil et une évacuation efficace des copeaux. Son intégration harmonieuse avec une machine-outil à commande numérique en fait un choix idéal pour les applications nécessitant une précision et une fiabilité élevées.

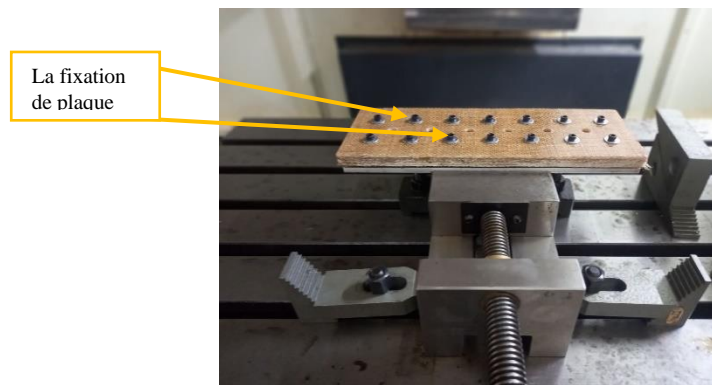


Figure 2 7: fixation de la plaque sur le montage

2.2.2-Montage d'usinage utilisé :

- Le montage d'usinage utilisé dans ce contexte est un dispositif spécialement conçu pour maintenir les pièces de manière stable et précise pendant le processus. Généralement, il consiste à fixer les pièces sur une table ou un plateau de la machine-outil à l'aide de dispositifs tels que des serre-joints, des brides ou des systèmes de serrage hydrauliques ou pneumatiques. Ensuite, les pièces sont positionnées et alignées avec précision selon les spécifications requises, parfois en utilisant des cales, des niveaux ou d'autres outils de mesure. Une fois correctement fixées et positionnées, le processus d'usinage peut commencer, impliquant divers outils et techniques comme le fraisage, le tournage, le perçage, ou d'autres opérations spécialisées.

En résumé, le montage d'usinage est essentiel pour maintenir les pièces en place de manière sécurisée et précise pendant l'usinage.

Pour la conception du dispositif, il est crucial de définir précisément les besoins et les spécifications en fonction des pièces et des opérations à effectuer. Cela inclut la conception de la structure, des composants et des mécanismes pour assurer l'efficacité et la fiabilité. Ensuite, il faut sélectionner les composants appropriés tels que les actionneurs, les moteurs, les systèmes de commande, etc., en veillant à leur compatibilité et leur qualité. La fabrication peut nécessiter l'usinage de pièces sur mesure et l'assemblage des composants, suivi de tests et ajustements pour assurer la précision. Une fois fabriqué, le dispositif doit être intégré à l'environnement d'usinage et programmé pour les opérations désirées, avec des tests de validation pour vérifier son bon fonctionnement.

La maintenance régulière est essentielle pour assurer la durabilité et la fiabilité du dispositif à long terme, avec des efforts continus d'amélioration pour optimiser les performances en réponse aux besoins changeants de la production. En somme, le développement d'un dispositif d'usinage nécessite un processus complexe allant de la conception à la fabrication, en passant par l'intégration et la programmation, avec un accent sur la qualité, la fiabilité et l'efficacité.

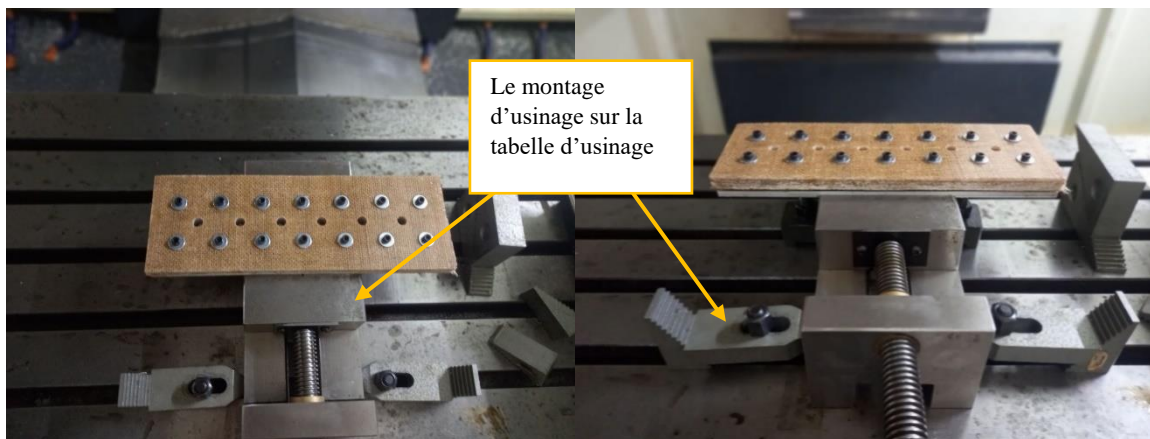


Figure 2 8: le montage de fixation dans CNC

2.2.3-Sélection des outils de fraisage appropriés pour les composites hybrides:

- Dans le processus d'usinage, [42, 75, 76] le choix approprié de l'outil et des paramètres de coupe revêt une importance capitale. Wang et ses collègues ont effectué une analyse approfondie de l'impact de la forme géométrique de l'outil de coupe sur ces paramètres. [77-79].

Dans cette étude, la sélection de l'outil de coupe a été principalement guidée par des données expérimentales provenant d'études antérieures portant sur la découpe de biocomposites lin/époxy. Delahaigue a utilisé une fraise abrasive HSS à quatre dents pour examiner les effets des paramètres de coupe et de l'orientation des fibres sur les forces de coupe et l'état de surface [80].

De même, Inoue et Hagino ont exploré l'utilisation de six outils, dont deux en acier rapide HSS, pour étudier les effets de la distance de coupe, de la force de coupe, de la température de coupe et de l'usure de l'outil sur les caractéristiques de surface des matériaux CFRP. Leurs résultats ont démontré que la force de coupe et la température de coupe augmentent lors de la découpe

de matériaux orientés de manière aléatoire, indépendamment du type d'outil de coupe utilisé. Leur conclusion souligne l'efficacité d'une fraise HSS à faible avancement combinée à une vitesse de broche élevée pour minimiser le délaminage et prolonger la durée de vie de l'outil de coupe[81].

Par conséquent, dans cette étude, un outil de coupe HSS d'un diamètre de 10 mm à quatre dents (Figs. 2.10 et 2.11) a été sélectionné pour la découpe du matériau composite hybride Luffa/Jute. Cette décision découle des conclusions tirées des recherches antérieures, mettant en évidence l'efficacité de ce type d'outil dans des conditions similaires.

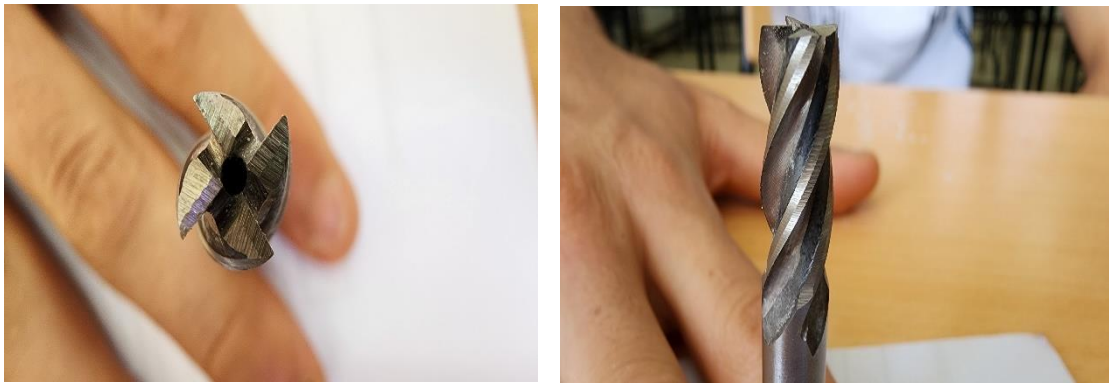


Figure 2 9: outil de coupe



Figure 2 10: Coupe transversale des outils de coupe

Tableau 2 1: Caractéristiques de l'outil.

<i>Matériel</i>	<i>Acier rapide (HSS)</i>
<i>Diamètre</i>	10mm
<i>Nombre de dents</i>	4
<i>Angle d'hélice</i>	30°
<i>Longueur totale</i>	70mm
<i>Longueur utile</i>	28mm

-Dans l'étude mentionnée, Delahaigue a utilisé une fraise abrasive HSS à quatre dents pour examiner les effets des paramètres de coupe et de l'orientation des fibres sur les forces de coupe et l'état de surface lors de la découpe de biocomposites lin/époxy. Les résultats de cette étude ont permis de mieux comprendre l'interaction entre l'outil de coupe et le matériau, ainsi que l'impact des paramètres de coupe sur les performances de l'usinage.

D'autre part, Inoue et Hagino ont étudié les influences de divers paramètres de coupe, tels que la distance de coupe, la force de coupe, la température de coupe et l'usure de l'outil, sur les caractéristiques de surface des matériaux CFRP. Leurs conclusions ont mis en évidence l'importance de choisir les paramètres de coupe appropriés pour minimiser les effets indésirables tels que le délaminage et pour optimiser la qualité de surface du matériau usiné.

Dans l'ensemble, ces études soulignent l'importance cruciale du choix de l'outil de coupe et des paramètres de coupe appropriés dans le processus d'usinage des matériaux composites. Les chercheurs ont montré que les fraises HSS, utilisées à des avancements faibles et des vitesses de broche élevées, peuvent être particulièrement efficaces pour réduire les dommages au matériau et prolonger la durée de vie de l'outil lors de l'usinage de ces matériaux exigeants.

2.2.4- Évaluation des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, etc.) pour le fraisage des composites:

- L'évaluation des paramètres de coupe pour le fraisage des composites est cruciale pour obtenir des résultats optimaux en termes de qualité de surface, de durabilité de l'outil et de productivité. Voici quelques considérations importantes lors de l'évaluation de ces paramètres:

1. Vitesse de coupe (V_c):

-Pour les composites, la vitesse de coupe doit être soigneusement choisie pour éviter la surchauffe du matériau. Une vitesse de coupe trop élevée peut générer de la chaleur excessive, provoquant des dommages aux fibres ou même une dégradation de la matrice.

-D'autre part, une vitesse de coupe trop basse peut entraîner une coupe inefficace et une usure prématurée de l'outil. Il est recommandé de commencer avec des valeurs de vitesse de coupe plus basses et d'augmenter progressivement tout en surveillant les effets sur la qualité de la coupe.

2. Avance (f):

-L'avance détermine la quantité de matériau enlevée à chaque passage de l'outil. Pour les composites, une avance trop élevée peut causer des délaminations, où les couches de fibres se séparent, réduisant ainsi la résistance et la qualité de la pièce.

-Une avance trop faible peut entraîner une usure excessive de l'outil, des vibrations excessives et une augmentation de la température de coupe. Il est recommandé de sélectionner une avance qui permet une évacuation efficace des copeaux sans endommager le matériau.

3.Profondeur de passe (ap):

- La profondeur de passe détermine la quantité de matériau enlevée verticalement à chaque passe de l'outil. Pour les composites, une profondeur de passe excessive peut entraîner des vibrations excessives, des contraintes excessives sur l'outil et des délaminations.

- Il est généralement recommandé de choisir une profondeur de passe plus faible, ce qui réduit le risque de délamination et de surcharge de l'outil. Des passes peu profondes peuvent également aider à maintenir la stabilité du processus.

4.Angle d'hélice de l'outil:

-L'angle d'hélice de l'outil peut influencer la manière dont les copeaux sont formés et évacués pendant le fraisage. Pour les composites, des angles d'hélice plus élevés peuvent aider à évacuer efficacement les copeaux, réduisant ainsi le risque de bourrage et de surchauffe.

- Des angles d'hélice plus élevés peuvent également réduire les forces de coupe et prolonger la durée de vie de l

5.Refrigération et lubrification: L'utilisation de fluides de coupe appropriés peut aider à réduire la chaleur générée pendant le fraisage des composites, ce qui peut contribuer à améliorer la durée de vie de l'outil et à maintenir la qualité de surface de la pièce.

6.Géométrie de l'outil: La géométrie de l'outil, y compris la forme des arêtes de coupe, peut être adaptée pour répondre aux exigences spécifiques des composites. Par exemple, des arêtes de coupe spécialement conçues peuvent aider à réduire les efforts de coupe et à minimiser les dommages.

6. Géométrie de l'outil: La géométrie de l'outil, y compris la forme des arêtes de coupe, peut être ajustée pour répondre aux exigences spécifiques des composites. Par exemple, des arêtes de coupe spécialement conçues peuvent aider à réduire les efforts de coupe et à minimiser les dommages.

2.2.5- Développement du plan d'expérience:

- Les plans d'expérience sont des outils essentiels en ingénierie et en sciences pour évaluer et optimiser les performances des processus en étudiant systématiquement les effets des différents facteurs. Leur importance réside dans leur capacité à fournir des informations précises et fiables sur les interactions entre les variables, permettant ainsi de déterminer les conditions optimales de fonctionnement et de prédire les résultats avec une plus grande précision. En utilisant des plans d'expérience, il est possible de réduire le nombre d'essais nécessaires, de minimiser les coûts et d'améliorer l'efficacité des processus.

Dans ce contexte, le plan d'expérience choisi est un plan factoriel complet à deux facteurs et cinq niveaux, totalisant 25 tests. Ce plan explore l'effet de différentes vitesses de coupe (V_c) et avances par tour (f) sur la vitesse d'avance (f en mm/min) lors d'opérations d'usinage. Les vitesses de coupe varient entre 10 m/min et 200 m/min, avec des vitesses de rotation correspondantes allant de 398 à 7958 tours par minute. L'avance par tour est ajustée de 0.14 mm/rev à 0.6 mm/rev, couvrant un large spectre de conditions de coupe (Tableau 2.2).

Par exemple, pour une vitesse de coupe de 10 m/min, la vitesse de rotation est maintenue à 398 rev/min, avec des avances par tour de 0.14, 0.25, 0.37, 0.48 et 0.6 mm/rev, ce qui donne des vitesses d'avance allant de 55.72 mm/min à 238.8 mm/min. À l'autre extrémité du spectre, pour une vitesse de coupe de 200 m/min et une vitesse de rotation de 7958 rev/min, les avances par tour de 0.14 à 0.6 mm/rev produisent des vitesses d'avance de 1114.12 mm/min à 4774.8 mm/min.

Ce plan d'expérience permet une analyse complète des interactions entre ces paramètres et leurs impacts sur les performances d'usinage, facilitant l'optimisation des conditions de coupe pour obtenir des résultats de qualité optimale.

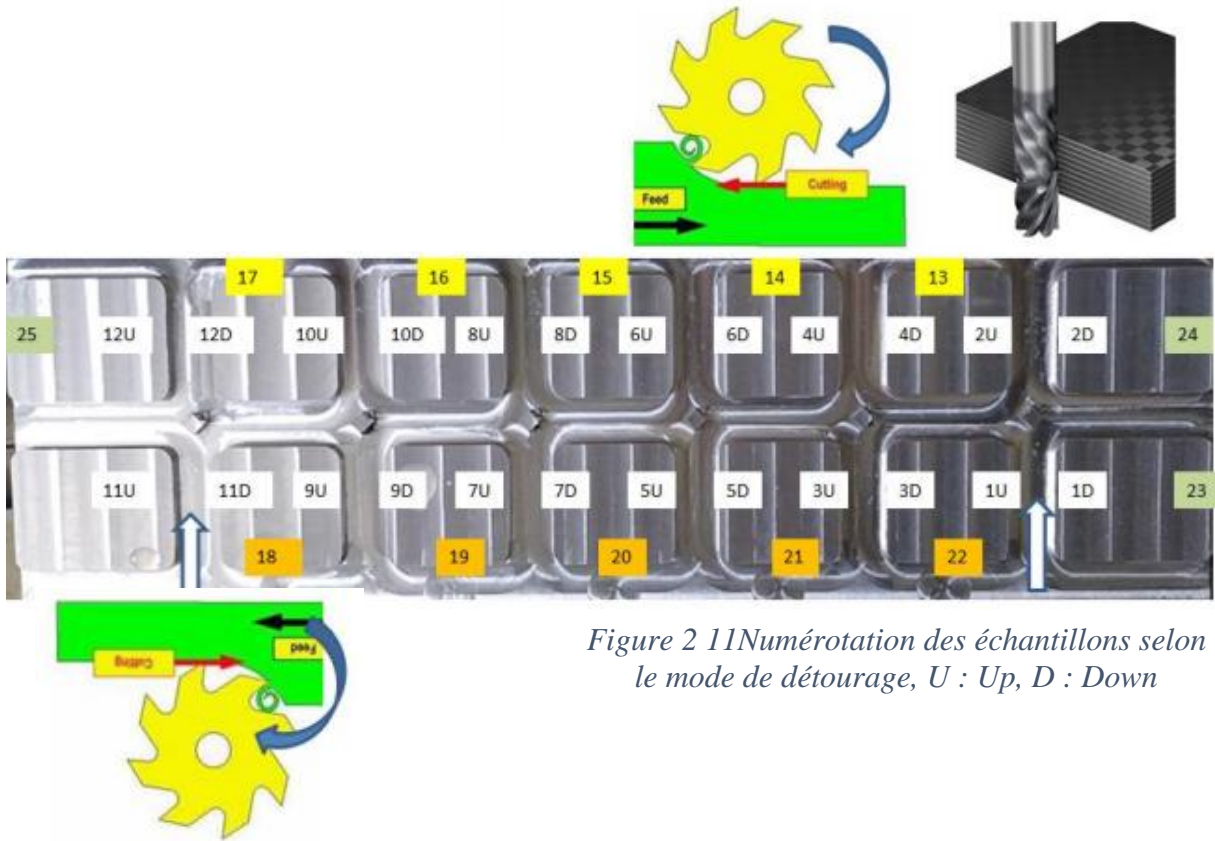


Figure 2 11 Numérotation des échantillons selon le mode de détourage, U : Up, D : Down

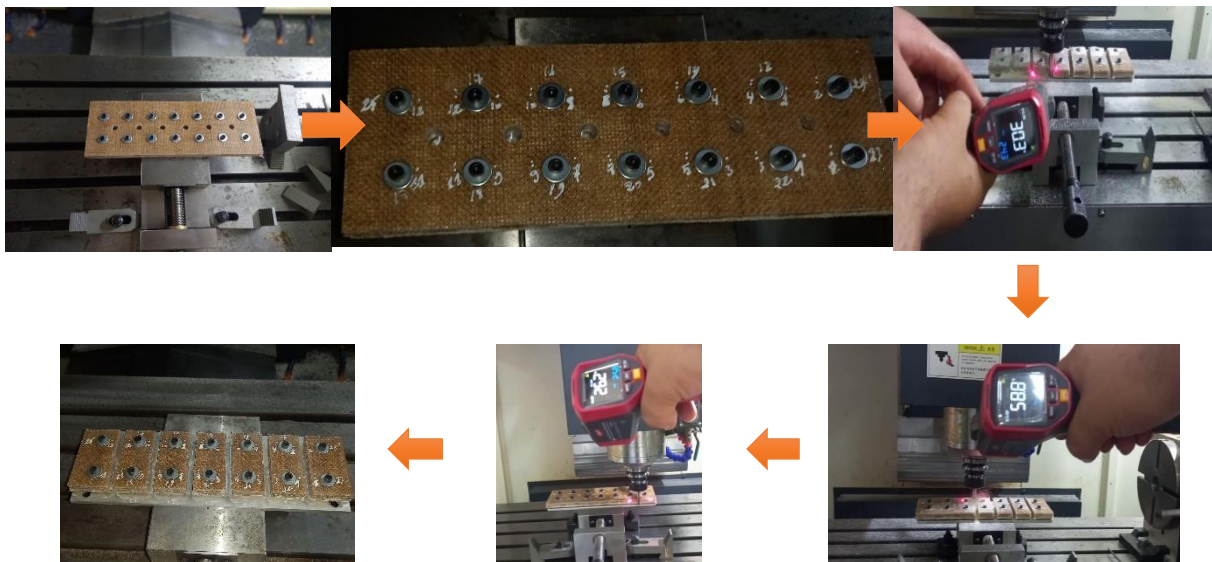


Figure 2 12: les étapes de détourage et mesure la température

Tableau 2 2: Plan d'Expérience Factoriel Complet pour l'Étude des Combinaisons de Paramètres de Coupe

<i>Expérience</i>	<i>Vc (m/min)</i>	<i>N(rev/min)</i>	<i>f (mm/rev)</i>	<i>f (mm/min)</i>
1	10	398	0.14	55.72
2	10	398	0.25	99.5
3	10	398	0.37	147.26
4	10	398	0.48	191.04
5	10	398	0.6	238.8
6	50	1990	0.14	278.6
7	50	1990	0.25	497.5
8	50	1990	0.37	736.3
9	50	1990	0.48	955.2
10	50	1990	0.6	1194
11	100	3979	0.14	557.06
12	100	3979	0.25	994.75
13	100	3979	0.37	1472.23
14	100	3979	0.48	1909.92
15	100	3979	0.6	2387.4
16	150	5968	0.14	835.52
17	150	5968	0.25	1492
18	150	5968	0.37	2208.16
19	150	5968	0.48	2864.64
20	150	5968	0.6	3580.8
21	200	7958	0.14	1114.12
22	200	7958	0.25	1989.5
23	200	7958	0.37	2944.46
24	200	7958	0.48	3819.84
25	200	7958	0.6	4774.8

-L'ordre de numérotation des échantillons dans ce plan expérimental, allant de 1 à 25, est illustré dans la figure 2.12. Cette figure montre également le type de fraisage utilisé pour chaque expérience, qu'il s'agisse de fraisage en opposition (up milling) ou en concordance (down milling).

La figure 2.12 permet ainsi de visualiser non seulement la séquence des échantillons mais aussi le mode de détournage appliqué, offrant une vue d'ensemble claire et détaillée des conditions expérimentales. Cela aide à comprendre l'agencement des tests et à identifier rapidement les paramètres de coupe associés à chaque échantillon.

2.2.7- Mesure de la température durant le détournage :

La mesure de la température pendant le détournage des matériaux composites est cruciale pour plusieurs raisons :

1. Contrôle de la chaleur : La chaleur excessive peut endommager le matériau composite, entraînant des déformations, des délaminations ou d'autres défauts de surface. En mesurant la température, vous pouvez ajuster les paramètres de coupe pour maintenir la chaleur à des niveaux acceptables.

2. Prévention de l'usure de l'outil : Des températures élevées peuvent également accélérer l'usure de l'outil de coupe. En surveillant la température, vous pouvez éviter les surchauffes qui pourraient réduire la durée de vie de l'outil et nécessiter des remplacements fréquents.

3. Optimisation des paramètres de coupe : La température de coupe peut varier en fonction de facteurs tels que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe. En mesurant la température pendant le détournage, vous pouvez identifier les paramètres optimaux pour minimiser la chaleur tout en maintenant des taux d'enlèvement de matière efficaces.

4. Détection des problèmes de processus : Des variations inattendues de température peuvent indiquer des problèmes potentiels dans le processus d'usinage, tels que des obstructions dans le système de refroidissement ou des erreurs de programmation CNC. En surveillant activement la température, vous pouvez identifier et résoudre ces problèmes rapidement pour éviter les défauts de pièce.

-Pour mesurer la température pendant le détournage, vous pouvez utiliser une variété de méthodes, notamment :

- Thermocouples** : Des capteurs de température peuvent être attachés à l'outil de coupe ou à la pièce pour mesurer la température en temps réel.

- Caméras thermiques** : Ces dispositifs peuvent capturer des images thermiques de la zone de coupe, permettant une surveillance visuelle de la température.

Surveillance thermographique en temps réel : L'utilisation de caméras thermographiques en temps réel peut fournir une visualisation instantanée des zones chaudes pendant le détournage. Cela permet aux opérateurs de surveiller activement les variations de température et de prendre des mesures correctives immédiates si nécessaire.

- Systèmes de surveillance intégrés** : Certains équipements d'usinage sont équipés de capteurs de température intégrés qui peuvent mesurer automatiquement la température pendant le processus d'usinage.

En utilisant ces méthodes de mesure de la température, il est possible de garantir un usinage efficace et de haute qualité des matériaux composites tout en minimisant les risques de défauts et d'usure de l'outil.

Analyse des données de température : Collectez et analysez les données de température sur une période prolongée pour identifier les tendances et les modèles. Cela peut fournir des informations précieuses sur les conditions de coupe, les variations de matériaux et les performances de l'outil, permettant ainsi des ajustements proactifs pour améliorer le processus d'usinage.

Corrélation avec d'autres paramètres : En plus de surveiller la température, il peut être utile de corréler ces données avec d'autres paramètres de processus, tels que la force de coupe, la vibration de l'outil et la qualité de surface de la pièce. Cela peut aider à comprendre les

interactions complexes entre différents facteurs et à optimiser le processus d'usinage dans son ensemble.

Documentation et traçabilité : Il est essentiel de documenter soigneusement les mesures de température ainsi que les paramètres de coupe associés pour chaque lot de pièces usinées. Cela permettra une traçabilité complète et facilitera l'analyse rétrospective en cas de problèmes de qualité ou de besoin d'optimisation ultérieure du processus.

En intégrant ces considérations dans l'approche de mesure de la température pendant le détournage des matériaux composites, il est possible de mieux contrôler le processus d'usinage, de réduire les risques de défauts et d'usure de l'outil, et de maintenir des normes élevées de qualité et de productivité.

Chapitre 3 :
Caractérisation des surfaces usinées

Introduction :

Dans le domaine des matériaux composites, la caractérisation des surfaces usinées est essentielle pour évaluer la qualité et les performances des pièces fabriquées. Cette étape permet d'identifier les défauts potentiels, de comprendre les mécanismes d'usure et d'altération des matériaux, et de garantir la conformité aux spécifications requises. Dans le cadre de cette recherche sur l'élaboration et le détourage des composites hybrides luffa/jute, l'analyse approfondie des surfaces usinées est centrale pour optimiser les processus de fabrication et améliorer la qualité des produits finaux.

Cette introduction fournit un aperçu des objectifs, des méthodes et des enjeux liés à la caractérisation des surfaces usinées dans le contexte des composites hybrides luffa/jute. Nous mettrons en avant l'importance de cette étape pour la fabrication de composites, en soulignant son impact sur la résistance mécanique, la durabilité et l'esthétique des pièces finales. Nous explorerons les défis spécifiques posés par les matériaux composites à base de fibres végétales, comme le luffa et le jute, et leur influence sur l'analyse des surfaces usinées.

Ensuite, la méthodologie adoptée pour caractériser les surfaces usinées sera détaillée, en mettant en lumière les techniques d'observation et de mesure, ainsi que les paramètres clés pris en compte lors de l'analyse. Nous aborderons les différentes approches pour évaluer l'intégrité des surfaces, incluant la détection et la classification des défauts tels que le délaminage, les éclats de fibres et les variations de rugosité.

Enfin, les implications de cette caractérisation seront discutées, en soulignant son rôle dans l'optimisation des paramètres de fabrication, l'amélioration de la qualité des pièces et la compréhension des interactions entre les outils de coupe et les matériaux composites. Cette section fournira une base méthodologique solide et une compréhension approfondie des enjeux liés à la caractérisation des surfaces usinées dans le contexte des composites hybrides luffa/jute.

3.Caractérisation des surfaces usinées :

3.1-Étude de l'intégrité de surface et des défauts résultant du processus de détournage, y compris le délaminage, à l'aide d'un microscope optique :

3.1.1- Analyse des dommages superficiels :

- Les matériaux composites présentent généralement des caractéristiques telles que la présence de fibres intactes, des particules de matériau déchirées et une résine thermiquement dégradée. Les défauts rencontrés pendant la fabrication varient en fonction des propriétés spécifiques du matériau. Le délaminage et les dommages superficiels sont parmi les défauts les plus fréquemment observés. Traditionnellement, la rugosité est mesurée pour quantifier ces défauts. Cependant, la rugosité Ra ne reflète pas toujours de manière précise les dommages survenus lors de l'usinage. En effet, cette mesure ne tient pas compte des dommages internes tels que le détachement des fibres, les fissures ou l'arrachement. Par conséquent, la rugosité seule ne permet pas de localiser ni de représenter de manière adéquate la répartition des dommages sur la surface usinée. Pour évaluer ces défauts avec précision, d'autres critères de qualification sont nécessaires. Une analyse microscopique est souvent indispensable pour confirmer l'absence de dommages de surface lorsque la rugosité Ra est utilisée comme indicateur de la rugosité. Identifier ces défauts est crucial pour garantir la faisabilité de l'utilisation de ces matériaux en alternative aux fibres synthétiques.

3.1.2- Analyse de la qualité des surfaces par microscope optique :

- Après avoir découpé les échantillons, les surfaces usinées sont examinées à l'aide d'un microscope optique pour évaluer visuellement l'effet des paramètres de coupe sur la qualité de la surface. Cette méthode permet également d'observer comment les fibres sont coupées en fonction de leur orientation. On peut constater la présence de résine fondue qui s'est solidifiée et fixée (voir Figure 3.1).



Figure 3 1: Image des défauts d'usinage rencontrés lors du détourage Composite de fibres Luffa/Jute

Des particules de fibres alfa sont détectées collées à la surface de la coupe. Des signes évidents de dommages thermiques sont visibles sur certains échantillons usinés (Figure 3.2).



Figure 3 2: Dommages thermique de la matrice et des fibres.

Des trous résultant de la perte de résine ont été identifiés sur la surface de coupe. De plus, des signes clairs de dommages thermiques ont été observés sur certains échantillons usinés, comme illustré à la Figure 3.2.

Pour les trous dus à la perte de résine, ils apparaissent généralement comme des cavités ou des vides dans la matrice composite. Ces imperfections peuvent compromettre l'intégrité

structurale du matériau et réduire ses performances mécaniques, notamment en termes de résistance et de durabilité. Les causes possibles de cette perte de résine incluent une application insuffisante de résine lors du processus de fabrication, une mauvaise imprégnation des fibres, ou encore des conditions d'usinage inappropriées qui entraînent l'extraction de la résine hors du matériau composite.

En ce qui concerne les dommages thermiques, ceux-ci se manifestent par des signes de dégradation sur la surface usinée, tels que des brûlures, des décolorations ou des fissures thermiques. Ces signes indiquent que la température de coupe a dépassé le seuil critique pour le matériau composite, entraînant une dégradation de la résine et des fibres. Les causes de ces dommages thermiques peuvent inclure une vitesse de coupe excessive, un manque de refroidissement adéquat, ou l'utilisation d'outils de coupe inappropriés. La Figure 3.2 montre ces dommages, mettant en évidence les zones affectées par la chaleur excessive pendant l'usinage.

Ces observations mettent en lumière l'importance d'optimiser les paramètres d'usinage et de surveiller les conditions de coupe pour minimiser les défauts de surface et les dommages thermiques dans les composites hybrides luffa/jute. Des ajustements appropriés, tels que la réduction de la vitesse de coupe, l'amélioration du refroidissement et l'utilisation d'outils adaptés, peuvent aider à prévenir ces problèmes et à améliorer la qualité des pièces usinées.

Aucune distinction entre les plis n'est perceptible, suggérant une altération de la matrice. De plus, il est clair que la température de transformation a été atteinte à la surface, entraînant la fusion de la résine et une homogénéisation de la surface. Des fibres brisées résiduelles, de la

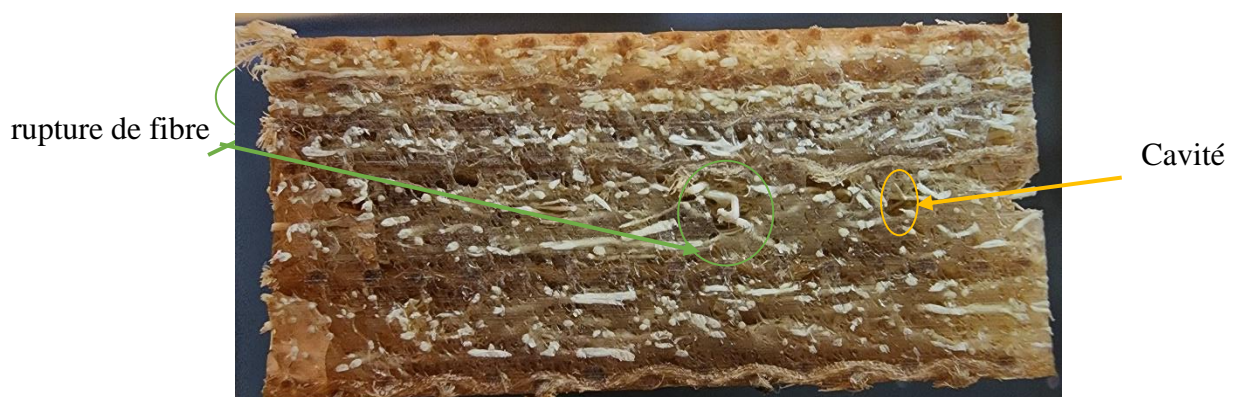


Figure 3 3: Illustration mettant en évidence la présence de cavité, la rupture des fibres.

résine solidifiée et stabilisée, des cavités, ainsi qu'une dégradation de la matrice sont également observées sur certaines des surfaces découpées (Figure 3.3).

La Figure 3.4 présente une visualisation des surfaces usinées des échantillons, obtenues par une coupe perpendiculaire aux fibres. Les deux modes de fraisage, en opposition (up milling) et en avalant (down milling), ont été appliqués dans des conditions de coupe équivalentes.



Figure 3.4: Mode de fraisage en avalant et mode de fraisage en opposition lors d'une coupe perpendiculaire à la fibre, a) Mode de détourage en opposition perpendiculaire à la fibre, $f=0.14\text{mm/rev}$ et $V_c = 100\text{m/min}$, b) Mode de détourage avalant perpendiculaire à la fibre, $f=0.14\text{mm/rev}$ et $V_c = 100\text{m/min}$

- Les images précédentes ainsi que celles du tableau 3.1 révèlent clairement que le fraisage en opposition génère des surfaces plus lisses et moins rugueuses que le fraisage en avalant. Cette observation visuelle indique que le fraisage en opposition offre des résultats supérieurs, avec des surfaces présentant une rugosité moindre comparé au fraisage en avalant. Les essais effectués en utilisant le fraisage en opposition ont démontré une performance améliorée, produisant des surfaces plus uniformes et réduisant la présence de fibres non coupées dans les deux modes de coupe.

Il est également intéressant de noter que, à des vitesses d'avance plus élevées, la quantité de fibres non coupées diminue, tandis qu'à des vitesses d'avance plus basses, cette quantité augmente. Cependant, il est important de souligner que l'impact de cette variation de vitesse d'avance sur la présence de fibres non coupées reste relativement modéré.

Ces observations mettent en évidence l'efficacité significative du fraisage en opposition pour les composites hybride Luffa/Jute pour obtenir des surfaces usinées de haute qualité, notamment en termes de réduction de la rugosité et de la présence de fibres non coupées, comparativement au fraisage en avalant.

Tableau 3 1: Compilation des images obtenues selon les conditions de coupe et les modes d'usinage en opposition (up milling) et en avalant (down milling).

Expérience	Vc (m/min)	N (rev/min)	f (mm/rev)	f (mm/min)	Température	up	down
1	10	398	0.14	55.72	59.7		
2	10	398	0.25	99.5	61		
3	10	398	0.37	147.26	61		
4	10	398	0.48	191.04	45.7		
5	10	398	0.6	238.8	52.6		
6	50	1990	0.14	278.6	69.9		
7	50	1990	0.25	497.5	74.7		
8	50	1990	0.37	736.3	53.7		
9	50	1990	0.48	955.2	61.3		
10	50	1990	0.6	1194	52.5		
11	100	3979	0.14	557.06	68.8		
12	100	3979	0.25	994.75	62.7		
13	100	3979	0.37	1472.23	34.4		
14	100	3979	0.48	1909.92	46.6		
15	100	3979	0.6	2387.4	27.9		
16	150	5968	0.14	835.52	52.3		
17	150	5968	0.25	1492	56		
18	150	5968	0.37	2208.16	59.2		
19	150	5968	0.48	2864.64	58.6		
20	150	5968	0.6	3580.8	59.1		
21	200	7958	0.14	1114.12	55.7		
22	200	7958	0.25	1989.5	40.6		
23	200	7958	0.37	2944.46	26.6		
24	200	7958	0.48	3819.84	31.8		
25	200	7958	0.6	4774.8	27.3		

3.1.3- Analyse de la température de coupe :

La figure 3.5 présente les résultats d'une série d'expériences visant à étudier l'effet de la vitesse de coupe (V_c) et de l'avance par tour (f) sur la température générée lors de l'usinage. En examinant les données, il est clair que la vitesse de coupe a un impact significatif sur la température générée. À une vitesse de coupe de 10 m/min, la température varie entre 45.7°C et 61°C, avec une légère diminution de la température à mesure que l'avance augmente, sauf pour les avances de 0.25 mm/rev et 0.37 mm/rev où la température reste constante à 61°C. À 50 m/min, la température est plus élevée, oscillant entre 52.5°C et 74.7°C, indiquant que l'augmentation de la vitesse de coupe tend à augmenter la température, bien que des fluctuations soient observées.

-Lorsque la vitesse de coupe atteint 100 m/min, les températures enregistrées varient de 27.9°C à 68.8°C, montrant une tendance générale à la diminution de la température avec l'augmentation de l'avance. À 150 m/min, les températures se stabilisent entre 52.3°C et 59.2°C, ce qui pourrait suggérer une stabilisation des conditions thermiques à cette vitesse de coupe. Enfin, à 200 m/min, la température varie de 26.6°C à 55.7°C, avec une tendance marquée à la diminution de la température à mesure que l'avance augmente.

-L'effet de l'avance par tour (f) sur la température révèle des tendances complexes qui varient en fonction de la vitesse de coupe. Pour chaque valeur de V_c , la température fluctue avec l'augmentation de f , mais ces variations ne sont pas uniformes. À des vitesses de coupe plus élevées, comme 150 et 200 m/min, l'augmentation de l'avance semble réduire la température plus régulièrement.

-Certaines anomalies et tendances méritent d'être soulignées. Les températures les plus basses sont observées à $V_c = 200$ m/min et $f = 0.37$ mm/rev (26.6°C), et à $V_c = 100$ m/min et $f = 0.6$ mm/rev (27.9°C). Cela peut indiquer que certaines combinaisons de haute vitesse de coupe et grande avance minimisent la génération de chaleur. En revanche, les températures les plus élevées sont enregistrées à $V_c = 50$ m/min et $f = 0.25$ mm/rev (74.7°C), et à $V_c = 100$ m/min et $f = 0.14$ mm/rev (68.8°C), suggérant que certaines combinaisons de paramètres peuvent conduire à des surchauffes locales.

-En conclusion, la vitesse de coupe (V_c) a un effet prononcé sur la température générée, avec des vitesses intermédiaires (50 m/min et 100 m/min) tendant à produire des températures plus élevées. L'avance par tour (f) influence également la température, mais son effet est plus complexe et dépend fortement de la vitesse de coupe utilisée. Pour minimiser la température, il semble efficace d'augmenter l'avance tout en maintenant une vitesse de coupe élevée. Toutefois, des tests supplémentaires sont nécessaires pour valider cette stratégie et confirmer la performance globale de l'usinage et la qualité des pièces. Ces observations peuvent aider à optimiser les paramètres d'usinage pour contrôler la température et ainsi améliorer la qualité des pièces et la durée de vie des outils.

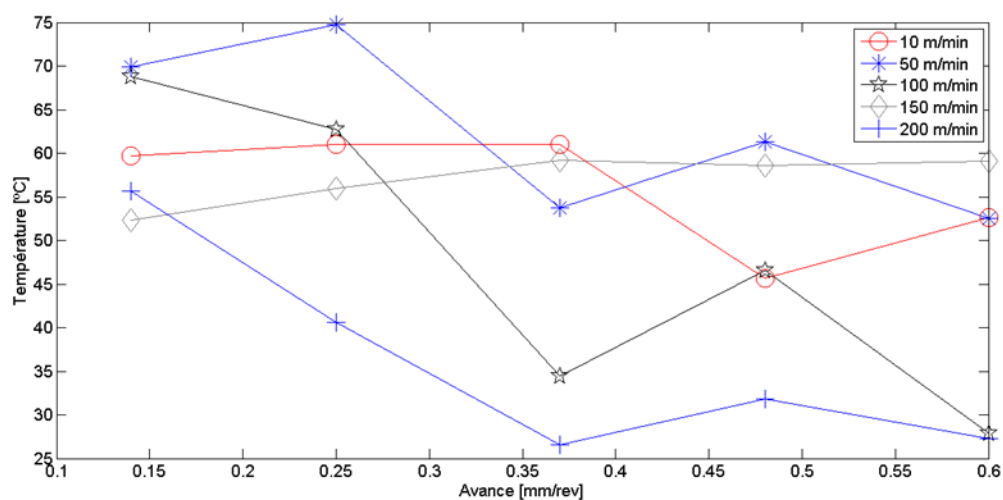


Figure 3 5: Variation de la température de coupe en fonction de l'avance et de la vitesse de coupe

Conclusion Générale

Conclusion :

- Cette recherche approfondie sur l'élaboration et l'usinage des composites hybrides à base de fibres de luffa et de jute a permis de tirer plusieurs conclusions importantes quant à la fabrication et la performance de ces matériaux innovants.

-L'élaboration du composite a montré que le choix des matrices polymères et des procédés de fabrication est crucial pour obtenir des propriétés mécaniques optimales. Les composites hybrides étudiés ont démontré une capacité prometteuse à combiner légèreté et résistance, deux caractéristiques essentielles pour de nombreuses applications industrielles.

-L'analyse des surfaces usinées a révélé que le mode de fraisage joue un rôle déterminant dans la qualité des surfaces obtenues. Les résultats ont montré que le fraisage en opposition (up milling) produit des surfaces plus lisses et moins rugueuses que le fraisage en avalant (down milling). Cette différence significative souligne l'importance de choisir le bon mode de fraisage pour minimiser les défauts de surface et améliorer l'intégrité structurelle des composants usinés. Les observations ont également indiqué une réduction notable des fibres non coupées lorsque le fraisage en opposition est utilisé, contribuant ainsi à des surfaces plus uniformes et de meilleure qualité.

-L'analyse de la température de coupe a révélé des tendances complexes qui ne suivent pas toujours une logique linéaire. Par exemple, certaines expériences ont montré que des vitesses de coupe intermédiaires peuvent entraîner des températures plus basses par rapport aux vitesses de coupe plus élevées ou plus basses. Ces résultats indiquent que l'optimisation des paramètres de coupe nécessite une compréhension approfondie des interactions thermiques et mécaniques, plutôt que des hypothèses simplistes. Il est crucial de suivre précisément les températures de coupe, ce qui peut être grandement facilité par l'utilisation de capteurs de température appropriés. L'adoption de tels instruments de mesure intégrés dans les futurs travaux permettra de minimiser les risques de défauts et de réduire l'usure des outils, assurant ainsi une meilleure qualité et durabilité des processus d'usinage.

-En fin, ce travail met en lumière l'importance de la caractérisation détaillée des surfaces usinées et du contrôle précis des températures de coupe pour améliorer la qualité et la

performance des composites hybrides luffa/jute. Les recommandations issues de cette étude offrent des stratégies claires pour optimiser les processus de fabrication, en tenant compte des défis spécifiques posés par les matériaux composites à base de fibres naturelles. Cette recherche constitue une base solide pour le développement de nouvelles applications industrielles, en favorisant des pratiques de fabrication plus efficaces et durables.

Références :

1. Baley, C., *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. 2005: Ed. Techniques Ingénieur.
2. Gornet, L., *Généralités sur les matériaux composites*. 2008.
3. Do Thi, V.V.D.T., *Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non*. 2011, Université de Grenoble; Université des Sciences Naturelles d'Ho Chi Minh Ville.
4. Teti, R.J.C.A., *Machining of composite materials*. 2002. **51**(2): p. 611-634.
5. Yan, L., N. Chouw, and K.J.C.P.B.E. Jayaraman, *Flax fibre and its composites—A review*. 2014. **56**: p. 296-317.
6. Faruk, O., et al., *Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010*. 2012. **37**(11): p. 1552-1596.
7. Bogoeva-Gaceva, G., et al., *Natural fiber eco-composites*. 2007. **28**(1): p. 98-107.
8. Muralidhar, B.J.M. and Design, *Study of flax hybrid preforms reinforced epoxy composites*. 2013. **52**: p. 835-840.
9. Ambid, M., *Evaluation de nanocomposites polypropylène/silicate pour l'isolation électrique: Etude des phénomènes de polarisation, de conduction et des propriétés optiques*. 2007, Toulouse 3.
10. Dewilde, B.J., *20 eeuwen vlas in Vlaanderen*. 1984.
11. Kvavadze, E., et al., *30,000-year-old wild flax fibers*. 2009. **325**(5946): p. 1359-1359.
12. Pejic, B.M., et al., *The effects of hemicelluloses and lignin removal on water uptake behavior of hemp fibers*. 2008. **99**(15): p. 7152-7159.
13. Baley, C.J.C.P.A.A.S. and Manufacturing, *Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase*. 2002. **33**(7): p. 939-948.
14. Zhu, J., et al., *Recent development of flax fibres and their reinforced composites based on different polymeric matrices*. 2013. **6**(11): p. 5171-5198.
15. CHERADID, Z., *Différents traitements des fibres des biomatériaux*.
16. Omar, A. and M.B.J.X.p.c. Khadra, *Esparto grass (Stipa tenacissima L.), raw material of papermaking. First part*. 2007(4): p. 25-30.
17. Guimaraes, J.L., et al., *Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil*. 2009. **30**(3): p. 407-415.
18. Chen, J.-P. and T.-C.J.B.e.j. Lin, *High-density culture of hepatocytes in a packed-bed bioreactor using a fibrous scaffold from plant*. 2006. **30**(2): p. 192-198.
19. Ogbonna, J.C., et al., *Loofa (Luffa cylindrica) sponge as a carrier for microbial cell immobilization*. 1994. **78**(6): p. 437-442.
20. Bou Saab, H., *Bioconversion éco-compatible de triterpénoïdes par des bactéries immobilisées sur Luffa cylindrica*. 2011, Mulhouse.
21. Ray, D., et al., *Effect of alkali treated jute fibres on composite properties*. 2001. **24**: p. 129-135.
22. Gupta, M., R. Srivastava, and H.J.I.J.F.T.R. Bisaria, *Potential of jute fibre reinforced polymer composites: A review*. 2015. **5**(3): p. 30-38.
23. Avril, C., et al. *Development of flax-reinforced bio-composites for high-load bearing automotive parts*. in *Proceeding of European Conference on Composite Materials (ECCM), Venice, Italy*. 2012.
24. Ozkan, D., et al., *Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability*. 2020: p. 235-253.
25. Chegdani, F., *Analyse multiéchelle de l'usinage des matériaux biosourcés: Application aux agrocomposites*. 2016, Paris, ENSAM.

26. MANSORI, M. and A. BOUAYAD, *EFFET DE LA GEOMETRIE DE L'OUTIL DE COUPE SUR LE PROCESSUS DE FORMATION DE COPEAU LORS DE L'USINAGE DES MATERIAUX COMPOSITES FRP*.
27. Li, H., et al, *Investigation of chip formation and fracture toughness in orthogonal cutting of UD-CFRP*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. **82**: p. 1079-1088.
28. Lasri, L., *Modélisation macromécanique et micromécanique de l'usinage des composites à matrice polymère et fibres longues*. 2009, Arts et Métiers ParisTech.
29. Doğan, M.A., et al., *A review on drilling of FML stacks with conventional and unconventional processing methods under different conditions*. 2022. **297**: p. 115913.
30. Abrao, A., et al., *The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite*. 2008. **29**(2): p. 508-513.
31. Giasin, K., et al., *The effect of cutting tool coating on the form and dimensional errors of machined holes in GLARE® fibre metal laminates*. 2020. **107**: p. 2817-2832.
32. Karataş, M.A. and H.J.D.T. Gökkaya, *A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials*. 2018. **14**(4): p. 318-326.
33. Aamir, M., et al., *Recent advances in drilling of carbon fiber–reinforced polymers for aerospace applications: A review*. 2019. **105**: p. 2289-2308.
34. Mouritz, A.P., *Introduction to aerospace materials*. 2012: Elsevier.
35. Giasin, K. and S.J.C.S. Ayvar-Soberanis, *An Investigation of burrs, chip formation, hole size, circularity and delamination during drilling operation of GLARE using ANOVA*. 2017. **159**: p. 745-760.
36. Giasin, K., *Machining fibre metal laminates and Al2024-T3 aluminium alloy*. 2017, University of Sheffield.
37. Giasin, K.J.T.I.J.o.A.M.T., *The effect of drilling parameters, cooling technology, and fiber orientation on hole perpendicularity error in fiber metal laminates*. 2018. **97**: p. 4081-4099.
38. Arul, S., et al., *The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites*. 2006. **46**(3-4): p. 252-259.
39. El-Sonbaty, I., U. Khashaba, and T.J.C.s. Machaly, *Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites*. 2004. **63**(3-4): p. 329-338.
40. Girod, F., et al., *Perçage des structures aéronautiques: Les résultats du projet MEDOC, 1er colloque Aquitaine–Québec–Mécanique des Matériaux et des Structures pour l'Aéronautique*. 2008, July.
41. Haddad, M., et al., *Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range*. 2014. **66**: p. 142-154.
42. Slamani, M., J.-F. Chatelain, and H.J.I.J.o.M.F. Hamedanianpour, *Influence of machining parameters on surface quality during high speed edge trimming of carbon fiber reinforced polymers*. 2019. **12**: p. 331-353.
43. Slamani, M., et al., *Edge trimming of flax fibers and glass fibers reinforced polymers composite—An experimental comparative evaluation*. 2021. **14**: p. 1497-1510.
44. Haddad, M., et al., *Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior*. 2014. **57**: p. 136-143.
45. Abrao, A., et al., *Drilling of fiber reinforced plastics: A review*. 2007. **186**(1-3): p. 1-7.
46. Che, D., et al., *Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: a literature review*. 2014. **136**(3): p. 034001.
47. Xu, J., et al., *An investigation of drilling high-strength CFRP composites using specialized drills*. 2019. **103**: p. 3425-3442.
48. Zitoune, R., *Analyses Des conditions d'usinage lors de perçage de structures*

- composites fibres longues en carbone/époxy*. 2004, Université Paul Sabatier, Toulouse.
49. Chandramohan, D., K.J.I.j.o.a.e.r. Marimuthu, and studies, *Drilling of natural fiber particle reinforced polymer composite material*. 2011. **1**(1): p. 134-145.
 50. Venkateshwaran, N., A.J.J.o.R.P. ElayaPerumal, and Composites, *Hole quality evaluation of natural fiber composite using image analysis technique*. 2013. **32**(16): p. 1188-1197.
 51. Bajpai, P.K., I.J.J.o.R.P. Singh, and Composites, *Drilling behavior of sisal fiber-reinforced polypropylene composite laminates*. 2013. **32**(20): p. 1569-1576.
 52. Benyettou, R., et al., *Assessment of induced delamination drilling of natural fiber reinforced composites: a statistical analysis*. 2022. **21**: p. 131-152.
 53. Gowd, B., *Effects of drilling parameters on delamination of hemp fiber reinforced composites*. 2012.
 54. Abilash, N. and M.J.J.o.K.S.U.-E.S. Sivapragash, *Optimizing the delamination failure in bamboo fiber reinforced polyester composite*. 2016. **28**(1): p. 92-102.
 55. Sridharan, V. and N.J.P.E. Muthukrishnan, *Optimization of machinability of polyester/modified jute fabric composite using grey relational analysis (GRA)*. 2013. **64**: p. 1003-1012.
 56. Babu, D., S. Babu, and B.J.J.M.E.C.S. Gowd, *Effects of machinig parameters in the drilling of jute fiber reinforced plastic: Evaluation of the delamination factor*, *Glob*. 2012. **2**: p. 57-62.
 57. Ahmad, S.A.S., *Effects of drilling parameters on delamination of coconut meat husk reinforced polyester composites*. 2013.
 58. Jayabal, S. and U.J.B.o.M.S. Natarajan, *Drilling analysis of coir-fibre-reinforced polyester composites*. 2011. **34**(7): p. 1563-1567.
 59. Naveen, P., M. Yasaswi, and R.J.J.M.C.E. Prasad, *Experimental investigation of drilling parameters on composite materials*. 2012. **2**: p. 30-37.
 60. Durão, L.M.P., et al. *Drilling delamination outcomes on glass and sisal reinforced plastics*. in *Materials Science Forum*. 2013. Trans Tech Publ.
 61. Malik, K., F. Ahmad, and E.J.J.o.N.F. Gunister, *Drilling performance of natural fiber reinforced polymer composites: a review*. 2022. **19**(12): p. 4761-4779.
 62. Helmi Abdul Kudus, M., et al., *Factors affecting hole quality during drilling of natural fiber-reinforced composites: A comprehensive review*. 2021. **40**(9-10): p. 391-405.
 63. Mohan Kumar, A., et al., *Comparative analysis of drilling behaviour of synthetic and natural fiber-based composites*. 2021. **2021**: p. 1-13.
 64. Mahadevappa, N., et al. *Study the impact of drilling process parameters on natural fiber reinforced herringbone epoxy composites*. in *Annales de Chimie-Science des Matériaux*. 2020.
 65. Rajamurugan, T., et al., *Analysis of drilling of coir fiber-reinforced polyester composites using multifaceted drill bit*. 2022. **2022**.
 66. Vinayagamoorthy, R. and N.J.I.J.C.M.M. Rajeswari, *Analysis of cutting forces during milling of natural fibered composites using fuzzy logic*. 2012. **2**(3): p. 15-21.
 67. Babu, G.D., K.S. Babu, and B.U.M.J.J.A.M.E. Gowd, *Effect of machining parameters on milled natural fiber-reinforced plastic composites*. 2013. **1**: p. 1-12.
 68. Slamani, M., et al., *Statistical analysis of surface roughness during high speed edge trimming of flax-fiber composite based on the Split-Split plot randomized complete block design*. 2021. **184**: p. 109921.
 69. Slamani, M., H. Chafai, and J.J.P.o.t.I.o.M.E. Chatelain, Part E: *Journal of Process Mechanical Engineering*, *Effect of milling parameters on the surface quality of a flax fiber-reinforced polymer composite*. 2022: p. 09544089221126087.
 70. Mahakur, V.K., S. Bhowmik, and P.K.J.P.o.t.I.o.M.E. Patowari, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*, *Machining parametric study on the natural fiber reinforced composites: a review*. 2022. **236**(11): p. 6232-6249.

71. Jain, A., C.S. Kumar, and Y. Shrivastava. *Machining of composite materials using different conventional and unconventional machining processes: a short review*. in *International Conference on Mechanical and Energy Technologies*. 2021. Springer.
72. Delahaigue J, C.J., Lebrun G, *Machining analysis of unidirectional and bi-directional fax-epoxy composite laminates*. Proc Inst Mech Eng Part L J Mater Design Appl, 2017. **196–209**: p. 231(1–2).
73. Chegdani, F., et al., *Effect of flax fiber orientation on machining behavior and surface finish of natural fiber reinforced polymer composites*. 2020. **54**: p. 337-346.
74. Chegdani, F., M.J.J.o.M.S. El Mansori, and Engineering, *New multiscale approach for machining analysis of natural fiber reinforced bio-composites*. 2019. **141**(1): p. 011004.
75. Cabrera, F.M., et al., *Sur l'usinabilité des composites à matrices polymères renforcée par des fibres*. 2010. **11**(2): p. 93-103.
76. Benardos, P., G.-C.J.I.j.o.m.t. Vosniakos, and manufacture, *Predicting surface roughness in machining: a review*. 2003. **43**(8): p. 833-844.
77. Wang, D., et al., *Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate*. 1995. **35**(12): p. 1623-1638.
78. Wang, D., et al., *Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II: multi-directional laminate*. 1995. **35**(12): p. 1639-1648.
79. Gejo, G., et al., *Recent advances in green composites*. 2010. **425**: p. 107-166.
80. Delahaigue, J., *Influence de la température de coupe sur les propriétés mécaniques en traction uni-axiale d'un composite carbone/époxy et étude de l'usinabilité d'un composite lin/époxy*. 2015, École de technologie supérieure.
81. Inoue, T. and M.J.I.J.o.A.T. Hagino, *Cutting characteristics of CFRP materials with carbon fiber distribution*. 2013. **7**(3): p. 285-291.