

Université Mohamed Boudiaf –M’sila

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



Numéro de série : ...

Numéro d'inscription : **D.MM/3C/03/19**

Thèse

Présentée pour l'obtention de diplôme de

DOCTORAT LMD

Spécialité : Génie mécanique

Option : Construction mécanique

THÈME

**ÉTUDE DE L'USINABILITÉ DES MATÉRIAUX COMPOSITES A
FIBRES NATURELLES**

Présentée par

Madani GRINE

Soutenue le 21/02/2024

Devant le jury composé de :

Prénom et Nom	Grades	Établissement	Qualité
Salah AMROUNE	Professeur	Univ. de M'sila	Président
Mohamed SLAMANI	Professeur	Univ. de M'sila	Directeur de thèse
Rabah BOUBAAYA	MCA	Université Mohamed Bachir el ibrahimi BBA	Examineur
Mokhtar DJENDEL	MCA	Université Mohamed Bachir el ibrahimi BBA	Examineur
Cherif SAIB	MCA	Univ. de M'sila	Examineur
Abdelmalek ELHADI	MCA	Univ. de M'sila	Examineur
Mansour ROKBI	Professeur	Univ. de M'sila	Invité

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers les membres du jury de ma thèse de doctorat, qui ont honoré cet événement par leur présence et par leur expertise.

Un remerciement particulier à Monsieur Salah AMROUNE, Professeur à l'Université de M'sila, qui préside ce jury. Mes remerciements s'adressent également à Monsieur SLAMANI Mohamed, Professeur à l'Université de M'sila, mon directeur de thèse, pour ses conseils éclairés et son soutien constant.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers les membres du jury, Monsieur BOUBAAYA Rabah, MCA à l'Université Mohamed Bachir EL IBRAHIMI BBA, Monsieur DJENDEL Mokhtar, MCA à l'Université Mohamed Bachir EL IBRAHIMI BBA, Monsieur Cherif SAIB, MCA à l'Université de M'sila, et Monsieur Abdelmalek ELHADI, MCA à l'Université de M'sila, pour leurs lectures et examens de ce travail.

Mes remerciements vont également à Monsieur Mansour ROKBI, Professeur à l'Université de M'sila, qui a accepté gracieusement et générosité de participer comme invité à ce jury.

Mes reconnaissances vont également envers M. Mustapha ARSLANE, Houari ZEGGANE, Aissa LAOUISSI et Mounir ROUABAH pour leurs aides et leurs conseils précieux.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers le personnel des universités de M'sila, Bordj Bou Arreridj et Ouargla pour avoir ouvert les portes de leurs laboratoires, contribuant ainsi à la réalisation de cette recherche.

Je n'oublie pas l'apport précieux de mes amis, ainsi que le soutien inestimable de mes parents et de ma petite famille. Merci à tous pour votre soutien continu et vos encouragements.

ملخص

في مواجهة التحديات البيئية الحالية، بدأ تطوير مواد صديقة للبيئة مثل مركبات الألياف الطبيعية كبديل موثوق للألياف الاصطناعية. تتمتع هذه المواد بالعديد من المزايا، بما في ذلك توفرها على نطاق واسع، والقدرة على تحمل التكاليف، والكثافة المنخفضة، وقابلية التحلل البيولوجي، وخصائص القوة المحددة، والحد الأدنى من التأثير البيئي. تركز هذه الدراسة على اعداد وتصنيع مادة مركبة إيبوكسي معززة بألياف الحلفاء (*Stipa Tenacissima L.*) من خلال التحليل العاملي الكامل، تستكشف الدراسة تأثير معلمات القطع، مثل سرعة القطع والتغذية، على خشونة الحسابية (Ra) للأسطح المُشكَّلة، الناتجة عن عمليات التفريز لأعلى و التفريز للأسفل.

في هذا السياق، تم اختيار أداة قطع الفولاذ عالية السرعة (HSS) على وجه التحديد، في حين تم تطبيق تحليل التباين (ANOVA) لتصنيف معلمات القطع بناءً على تأثيرها على جودة السطح للمركب للإيبوكسي/ ألفا. من أجل التنبؤ بخشونة السطح، تم البحث عن بنية الشبكة العصبية الاصطناعية الأمثل (ANN) وقد أدى ذلك إلى اعتماد نهج هجين (ANN-GA) يدمج تقنية ANN مع الخوارزميات الجينية (GA). تمت مقارنة أداء بنية ANN-GA المطورة حديثاً بأداء خوارزمية الانتشار العكسي (Levenberg-Marquardt (LM).

تشير النتائج إلى أن التفريز لأعلى يولد باستمرار جودة سطح أفضل مقارنة بالتفريز للأسفل لمعظم العينات المجهزة. وجد أن معدل التغذية هو العامل الرئيسي الذي يؤثر على خشونة السطح، حيث يساهم في حوالي 90% من الاختلافات الملحوظة. تؤدي معدلات التغذية المنخفضة بشكل خاص (0.05 مم/لفة) بشكل منهجي إلى أسوأ خشونة حسابية، بغض النظر عن سرعة القطع. بالإضافة إلى ذلك، تكشف الدراسة أن المعالجة الموازية لاتجاه الألياف (0 درجة) تنتج أسطحاً أكثر نعومة مقارنةً بالمعالجة المتعامدة مع اتجاه الألياف (90 درجة). كشف الفحص الدقيق باستخدام الصور المجهرية والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) عن عيوب مختلفة، مثل شقوق المصفوفة، والتجويبات، وفواصل الألياف، وفقدان المصفوفة، والوبر والتلف الحراري.

تسلط نتائج تحليل التباين (ANOVA) الضوء على التأثير الكبير لمعدل التغذية على خشونة السطح، في حين أن المعالجة الكيميائية للألياف واتجاه التصنيع لها تأثيرات أصغر نسبياً. بالإضافة إلى ذلك، وجد أن النموذج التنبؤي ANN-GA لخشونة السطح الأمثل دقيق بشكل ملحوظ مقارنة بخوارزمية LM، حيث يُظهر قيم R^2 و RSME و MAD و MAPE و MAE عند 0.9529 و 0.665 و 1.009 و 11.84% و 0.4339 على التوالي.

Abstract

In the face of current environmental challenges, the development of eco-friendly materials like natural fiber composites emerges as a viable alternative to synthetic fibers. These materials come with numerous advantages, including widespread availability, affordability, low density, biodegradability, specific resistance properties, and minimal environmental impact. This study focuses on the manufacturing and machining of an epoxy composite material reinforced with Alfa fibers (*Stipa tenacissima* L.). Through comprehensive factorial analysis, the study investigates the influence of cutting parameters, such as cutting speed and feed rate, on the arithmetic roughness (Ra) of machined surfaces, resulting from both up milling and down milling operations.

In this context, a high-speed steel (HSS) cutting tool was specifically chosen, while analysis of variance (ANOVA) was applied to categorize cutting parameters based on their impact on the surface quality of Epoxy/Alfa bio composite. To predict surface roughness, an optimal artificial neural network (ANN) architecture was sought. This led to the adoption of a hybrid approach (ANN-GA) that integrates the ANN technique with genetic algorithms (GA). The performance of this newly developed ANN-GA architecture was compared to that of the Levenberg-Marquardt backpropagation algorithm (LM).

The results indicate that the up milling trimming mode consistently generates a better surface quality compared to the down milling trimming mode for most of the machined specimens. Feed rate proves to be the major factor influencing surface roughness, contributing to about 90% of the observed variations. Particularly low feed rates (0.05 mm/rev) systematically result in the poorest arithmetic roughness, regardless of the cutting speed. Furthermore, the study reveals that machining parallel to the fiber direction (0°) produces smoother surfaces compared to machining perpendicular to the fiber orientation (90°). A detailed examination using microscopic images and scanning electron microscopy (SEM) has highlighted various defects such as matrix cracks, cavities, fiber breaks, matrix losses, lint, and thermal damage.

The results of the analysis of variance (ANOVA) highlight the significant impact of the feed rate on surface roughness, while fiber chemical treatment and machining direction have comparatively smaller effects. Moreover, the predictive model ANN-GA for optimized surface roughness has proven to be remarkably accurate compared to the LM algorithm, showing values of R^2 , RSME, MAD, MAPE, and MAE at 0.9529, 0.665, 1.009, 11.84%, and 0.4339 respectively.

Résumé

Face aux enjeux environnementaux actuels, le développement de matériaux respectueux de l'environnement tels que les composites de fibres naturelles s'impose comme une alternative crédible aux fibres synthétiques. Ces matériaux présentent de nombreux avantages, notamment leur disponibilité généralisée, leur coût abordable, leur faible densité, leur biodégradabilité, leurs propriétés de résistance spécifiques et leur impact environnemental minime. Cette étude se concentre sur la fabrication et l'usinage d'un matériau composite époxy renforcé avec des fibres d'Alfa (*Stipa tenacissima* L.). À travers une analyse factorielle complète, l'étude explore l'influence des paramètres de coupe, tels que la vitesse de coupe et l'avance, sur la rugosité arithmétique (R_a) des surfaces usinées, issues des opérations de détourages en opposition (Up milling) et en avalant (Down milling).

Dans ce contexte, un outil de coupe en acier rapide (ARS) a été spécifiquement choisi, tandis qu'une analyse de variance (ANOVA) a été appliquée pour classer les paramètres de coupe en fonction de leur impact sur la qualité de surface du composite époxy/Alfa. En vue de prédire la rugosité de surface, une architecture optimale de réseau neuronal artificiel (ANN) a été recherchée. Cela a conduit à l'adoption d'une approche hybride (ANN-GA) qui intègre la technique ANN avec des algorithmes génétiques (GA). Les performances de cette architecture ANN-GA nouvellement développée ont été comparées à celles de l'algorithme de rétropropagation de Levenberg-Marquardt (LM).

Les résultats indiquent que le mode de détourage en opposition génère systématiquement une meilleure qualité de surface par rapport au mode de détourage en avalant pour la plupart des échantillons usinés. La vitesse d'avance se révèle être le principal facteur influençant la rugosité de surface, contribuant à environ 90 % des variations observées. Des vitesses d'avance particulièrement faibles (0,05 mm/tour) entraînent systématiquement la plus mauvaise rugosité arithmétique, indépendamment de la vitesse de coupe. De plus, l'étude révèle que l'usinage parallèle à la direction des fibres (0°) produit des surfaces plus lisses par rapport à l'usinage perpendiculaire à l'orientation des fibres (90°). Un examen approfondi à l'aide d'images microscopiques et de microscopie électronique à balayage (SEM) a mis en évidence divers défauts, tels que des fissures dans la matrice, des cavités, des ruptures de fibres, des pertes de matrice, des peluches et des dommages thermiques.

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) mettent en évidence l'impact significatif de la vitesse d'avance sur la rugosité de surface, tandis que le traitement chimique des fibres et la direction d'usinage ont des effets comparativement moindres. De plus, le modèle prédictif ANN-GA pour la rugosité de surface optimisée s'est avéré remarquablement précis par rapport à l'algorithme LM, affichant des valeurs de R^2 , RSME, MAD, MAPE et MAE à 0,9529, 0,665, 1,009, 11,84% et 0,4339 respectivement.

Table des matières

Liste de tableaux.....	8
Liste des figures	9
Liste des abréviations.....	12
Introduction générale.....	13
Chapitre 1: État de l'art : Étude de l'usinabilité des composites à fibres naturelles	
1.1 Introduction	17
1.2 Les matériaux composites	18
1.2.1 Les matrices.....	18
1.2.2 Les renforts.....	19
1.3 Les fibres naturelles.....	20
1.3.1 Les fibres animales.....	20
1.3.2 Les fibres minérales.....	20
1.3.3 Les fibres végétales	20
1.3.4 Classification des fibres végétales.....	21
1.3.5 Propriétés mécaniques des fibres végétales.....	22
1.4 Applications des composites à fibres naturelles	24
1.5 Les fibres d'Alfa.....	25
1.5.1 L'utilisation de la plante d'Alfa	25
1.5.2 Propriétés mécanique	28
1.5.3 Caractéristiques et applications des composites à fibres d'Alfa.....	28
1.6 Usinage des composites.....	29
1.6.1 Enlèvement de matiere par détournage	30
1.6.1.1 Détournage	32
1.6.1.2 Détournage des matériaux composites à fibres synthétiques	33
1.6.1.2.1 L'usinage composites à matrice polymère renforcés de fibres de carbone (CFRP)...	34
1.6.1.2.2 L'usinage composites à matrice polymère renforcés avec des fibres de verre GFRP (glass fiber reinforced polymer).....	43
1.6.1.3 Détournage des composites à fibre naturelle.....	45
1.7 Conclusion.....	50
Chapitre 2: Méthodologie expérimentale	
21 Introduction	57
22 Présentation et élaboration du matériau composite	57
2.2.1 Fibres d'Alfa utilisées	57
2.2.2 La collecte de la plante d'Alfa.....	58
2.2.3 L'extraction des fibres d'Alfa	58
2.2.4 Le rouissage à l'eau.....	59
2.2.5 L'extraction mécanique	59
2.2.6 Le séchage	59
2.2.7 Traitement alcalin l'hydroxyde de sodium (fibres traitées).....	60
23 Classification des types de tissus.....	61
24 Resine epoxy	62
25 Fabrication des plaques composites	63
26 Dispositif d'usinage.....	64
2.6.1 Fixation de la plaque.....	64
2.6.2 Machine et dispositif d'usinage.....	64
2.6.3 Outil de coupe	65

2.7	Plan d'expérience	66
2.7.1	La rugosité de surface (<i>Ra</i>).....	67
2.7.2	Mesure du délaminage.....	69
Chapitre 3: Étude du comportement à l'usinage d'un matériau composite unidirectionnel Époxy /Alfa (Stipa tenacissima L.)		
3.1	Introduction	73
3.2	Détourage des plaques époxy/Alfa.....	74
3.3	Analyse des résultats de rugosité.....	77
3.3.1	Analyse des dommages superficiels.....	83
3.3.2	Analyse de la qualité des surfaces par microscope optique.....	83
3.3.3	Analyse de la qualité des surfaces par microscope électronique à balayage (MEB).....	86
3.4	Conclusion.....	87
Chapitre 4: Analyse statistique de la rugosité de surface des biocomposites Époxy/fibre d'Alfa		
4.1	Introduction	90
4.2	Les données	91
4.3	Analyse de la variance (ANOVA) pour le composites non traité par NaOH.....	91
4.4	Analyse de la variance (ANOVA) pour le composite traité par NaOH	93
4.5	Theorie de la régression multiple modele cubique	94
4.5.1	Etablissement du modèle pour le composite non traités par NaOH.....	95
4.5.1.1	Modèle global pour un usinage en opposition avec effet orientation (0° et 90°)	95
4.5.1.2	Modèle global pour un usinage en avalant (down milling) avec effet orientation (0° et 90°).....	98
4.5.2	Etablissement du modèle pour le composite traités par NaOH	101
4.5.2.1	Modèle global pour un usinage en avalant avec effet orientation (0° et 90°).....	101
4.5.2.2	Modèle global pour un usinage en opposition avec effet orientation (0° et 90°)	102
4.6	Conclusion.....	105
Chapitre 5: Modélisation de la rugosité de surface des biocomposites époxy/fibre Alfa à l'aide d'une architecture de réseau de neurones Optimisée avec des algorithmes génétiques		
5.1	Introduction	106
5.2	Conception de l'expérience.....	106
5.3	Analyse des resultats	108
5.3.1	Analyse de la variance (ANOVA).....	110
5.3.2	Modélisation ANN-GA	112
5.3.2.1	Modélisation ANN	112
5.3.2.2	Les algorithmes génétiques	115
5.3.2.3	Optimisation de d'un réseau de neurones « ANN » par les algorithmes génétiques.....	117
5.3.3	Présentation de l'algorithme d'optimisation d'un réseau de neurones	117
5.3.3.1	Paramètres d'optimisation :.....	119
5.4	Resultats des predictions ANN-GA.....	121
5.5	Comparaison entre les algorithmes ANN-GA et LM.....	125
5.6	Conclusion.....	127
Conclusion générale et perspectives		134
Références bibliographiques		137

LISTE DE TABLEAUX

N°	Titres des Tableaux	Pages
1.1	Propriétés physiques principales des résines thermodurcissable et thermoplastique	19
1.2	Domaines d'application des composites à fibres naturelles	25
1.3	Les propriétés mécanique de la fibre d'Alfa selon plusieurs sources	28
1.4	Paramètres des échantillons de faisceaux courts (outils usés)	38
1.5	Conditions de coupe de base	44
1.6	Niveaux des facteurs de l'expérience	46
2.1.	Caractéristiques de NaOH	60
2.2.	Caractéristiques des fibres d'Alfa	61
2.3	Caractéristiques de l'outil	66
2.4	Plan expérimental factoriel complet	66
4.1.	Résultats de la régression pour un usinage en opposition (non traitées).	96
4.2.	Résultats de la régression pour un usinage en avalant (non traitées).	98
4.3.	Résultats de la régression pour différent mode d'usinage(non traitées)	99
4.4.	Résultats de la régression pour un usinage en avalant (traitées)	101
4.5.	Résultats de la régression pour un usinage en opposition (traitées)	102
4.6.	Résultats de la régression pour différent mode d'usinage (traitées)	104
5.1	Niveaux des différents paramètres de coupe	107
5.2.	Résultats R_a selon les conditions de coupe	108
5.3.	ANOVA du modèle R_a e les valeurs variables explicatives R_a .	110
5.4.	Fonctions d'erreur et ses équations	119
5.5.	Paramètres d'optimisation ANN.	120
5.6.	Résultats de R_a prédit par ANN.	121
5.7.	Erreurs de prédiction ANN.	122
5.8.	Architecture ANN-GA optimale pour les cinq meilleures itérations.	125
5.9.	Comparaison entre ANN-GA et LM.	126

LISTE DES FIGURES

N°	Titres des figures	Pages
1.1	Structure d'une fibre végétale	21
1.2	Classification des fibres végétales selon l'origine	22
1.3	Schéma illustrant les deux configurations d'usinage par détournage	30
1.4	Mécanisme de coupe de détournage orthogonale en fonction de l'orientation de plis	31
1.5	Opération de détournage	32
1.6	Évolution de l'effort de coupe au cours de détournage en avalant	36
1.7	Température de coupe des échantillons de faisceaux courts	39
1.8	Profils moyennes des températures de coupe	40
1.9	Fibres non coupées	40
1.10	Valeurs mesurées par rapport aux valeurs prévues des composantes de la force de coupe	42
1.11	Forces enregistrées dans les directions x, y et z à l'aide d'outils neufs et usés	43
1.12	Présentation des éprouvettes et situation des mesures d'état de surface	44
1.13	Évolution de Ra à 0° en fonction de fz	45
1.14	Évolution de Ra à 90° en fonction de fz	45
2.1	L'Alfa dans son biotope	58
2.2	L'extraction mécanique des fibres	59
2.3	Le séchage des fibres	60
2.4	Les fibres traitées par NaOH à 5%	60
2.5	Renforts unidirectionnels (UD)	62
2.6	Tissage d'Alfa	62
2.7	Moulage sous vide pour la production de plaques composites	63
2.8	Plaques Époxy/Alfa produites	63
2.9	Plaques Époxy/Alfa produites	64
2.10	Centre d'usinage PEARL RIVER NC F-VMC 510L	64
2.11	Plaque composite fixée sur le montage d'usinage	65
2.12	Dispositif d'usinage	65
2.13	Outil de coupe acier rapide (ARS)	66
2.14	Modes de coupe sur chaque face	67
2.15	Testeur de rugosité Mitutoyo Sufitest-4	68
2.16	Présentation d'éprouvette et situation des mesures de l'état de surface	68
2.17	Différents modes de délaminage et leur mesure	69

LISTE DES FIGURES

N°	Titres des figures	Pages
2.18	Microscope universel	70
2.19	Microscope électronique à balayage EVO15	71
3.1	Montage expérimental pour le composite Époxy/Alfa	74
3.2	Les faces d'usinage du coupons du composite Époxy/Alfa	75
3.3	Rainure parallèle à l'orientation des fibres	76
3.4	Rainure perpendiculaire à l'orientation des fibres	76
3.5	Fumée émise lors du rainurage du composite de fibres d'Alfa	77
3.6	Rugosité de surface Ra en fonction de l'orientation des fibres en modes de fraisage opposition et avalant	78
3.7	Ra en fonction de la vitesse d'avance en mode fraisage en opposition à 90° .	79
3.8	Ra en fonction de la vitesse d'avance en mode fraisage en avalant à 90°	79
3.9	Ra en fonction de la vitesse d'avance en mode fraisage en opposition à 0° .	80
3.10	Ra en fonction de la vitesse d'avance en mode fraisage en avalant à 0°	80
3.11	Ra en fonction de la vitesse de coupe (Vc) en mode fraisage en opposition à 90° .	81
3.12	Ra en fonction de la vitesse de coupe (Vc) en mode fraisage en avalant à 90°	81
3.13	Ra en fonction de la vitesse de coupe (Vc) en mode fraisage en opposition à 0° .	82
3.14	Ra en fonction de la vitesse de coupe (Vc) en mode fraisage en avalant à 0° .	82
3.15	Image des défauts d'usinage rencontrés lors du détournage composite à fibres d'Alfa	83
3.16	Dommages thermiques de la matrice et des fibres	84
3.17	Illustration mettant en évidence la présence de cavités, la rupture des fibres et la dégradation de la matrice.	84
3.18	Mode de fraisage en avalant et mode de fraisage en opposition lors d'une coupe perpendiculaire à la fibre	85
3.19	Image MEB typique de la surface découpée en époxy/Alfa composite	86
3.20	Image MEB haute résolution révélant des défauts spécifiques dans le matériau composite époxy/Alfa	87
4.1	Coupons et mode d'usinage	91
4.2	Contribution en pourcentage des paramètres de coupe sur la rugosité de surface pour une orientation 90°	92
4.3	Contribution en pourcentage des paramètres de coupe sur la rugosité de surface pour une orientation 0°	93
4.4	Contribution des paramètres de coupe sur la rugosité de surface pour une orientation à 0° et traitées	93
4.5	Contribution des paramètres de coupe sur la rugosité de surface pour une orientation à 90° et traitées	94

N°	Titres des figures	
5.1	Configuration expérimentale	107
5.2	Surfaces de réponse en 3D pour Ra	111
5.3	Présentation graphique d'un ANN.	112
5.4	Organigramme d'optimisation de l'architecture ANN par GA	118
5.5	Diagramme en forme d'araignée des indices de performance pour les cinq meilleures itérations	123
5.6	Corrélation entre les valeurs expérimentales et estimées par ANN-GA.	124
5.7	Corrélation entre les valeurs expérimentales et estimées par ANN-GA et LM.	126

LISTE DES ABRÉVIATIONS

UD	Unidirectionnels
MOCN	Machine-outil à commande numérique
CFRP	Plastique renforcé par fibres de carbone
ARS	Acier Rapide Supérieur
MEB	Microscope électronique à balayage
DOE	Design Of Expériment (Plan d'expérience)
ANOVA	Analyse de la variance
ANN	Réseau de neurones artificiels
GA	Algorithme génétique
NT	Fibre Non Traitée
T	Fibre Traitée
ddl	Degrés de liberté
SEC	Somme des carrés
MS	Carrés moyens
Prob	Probabilité
Cont. %	Contribution (%)
R	Coefficient of corrélation
RMSE	Root Mean Square Error (Erreur quadratique moyenne)
MAD	Mean Absolute Deviation (Déviation absolue)
MAPE	Mean Absolute Percentage (Error Erreur moyenne absolue en pourcentage)
MAE	Mean Absolute Error (Erreur absolue moyenne)
IP	Indices de Performance
LM	Algorithme Levenberg-Marquardt
<i>Ra</i>	Rugosité Moyenne Arithmétique

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les fibres naturelles présentent un bon potentiel pour de futures applications dans les applications d'infrastructure. Ces dernières années, les fibres végétales comme le chanvre, le lin, le jute, le kénaf, le bambou et l'Alfa ont attiré une grande attention, pour leurs de nombreuses applications, tels que l'automobile, l'ameublement, l'emballage et la construction [1-5]. Ces fibres possèdent des propriétés particulièrement impressionnantes [6]. Elles offrent de nombreux avantages économiques, techniques et écologiques par rapport aux fibres synthétiques dans le renforcement des composites polymères [7, 8]. Leur coût abordable, leur biodégradabilité, leurs remarquables propriétés mécaniques, leur résistance à l'eau et à la décomposition, leur stabilité dimensionnelle et leur adaptabilité en font des choix très attractifs pour diverses applications. Les composites de fibres naturelles (CFN) se distinguent également par leur amélioration de la résistance électrique, leurs excellentes propriétés d'isolation thermique et acoustique, ainsi que leur résistance accrue aux fractures [9].

Les propriétés mécaniques des composites polymères à base de fibres naturelles sont fortement influencées par l'adhérence à l'interface entre la fibre et la matrice polymère [10-13], ce phénomène s'expliquant principalement par l'abondance en cellulose, cellulose transcrite, pectine et lignine des fibres naturelles. Les fibres naturelles ont tendance à être des matériaux polaires et riches en eau, tandis que les polymères sont très perméables à l'eau. En d'autres termes, des problèmes de compatibilité importants surviennent entre la fibre et la matrice, affaiblissant la zone de contact entre la fibre naturelle et le polymère. Cependant, divers chercheurs ont signalé que des traitements chimiques à savoir le blanchiment, l'acétylation et le traitement alcalin peuvent améliorer l'adhérence superficielle des fibres à la matrice [14, 15]. Par exemple, EL-Abbassi et al. [16] ont étudié le vieillissement de composites obtenus par pulvérisation de résine polypropylène avec des fibres courtes d'Alfa, traitées et non traitées. Ils ont observé une augmentation significative du module d'Young et de la contrainte de rupture des fibres traitées. De même, dans les résultats des tests de traction Amroune et al pour des fibres de palmier dattier [17,18] et flexion, Rokbi et al. [15] ont montré que la concentration de NaOH et la durée du traitement ont un impact significatif sur les propriétés mécaniques des composites à base de fibres d'Alfa. Cependant, l'usinage de ces matériaux est complexe en raison de leur structure anisotrope et non homogène, ainsi que de la forte abrasivité des renforts [19].

Pour définir l'état de surface finale d'une structure métallique ou composite, plusieurs paramètres influençant la qualité de l'usinage en raison des interactions entre l'outil et le matériau doivent être pris en compte. En ce qui concerne l'outil, ces caractéristiques englobent des éléments du matériau, en l'occurrence le diamètre, le nombre de dents, la longueur utile, l'angle d'hélice, le rayon d'affûtage des

bords, l'angle de dépouille et l'angle d'attaque. En ce qui concerne la nature du matériau usiné, elle est associée à des paramètres liés au type de fibre (naturelle, synthétique, etc.), la direction des fibres, le nombre de couches superposées et l'épaisseur usinée. L'interaction entre l'outil de coupe et le matériau usiné est également influencée par des paramètres de coupe, qui sont la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe dont laquelle l'outil de coupe se déplace, comme indiqué par Wang et Zhang [20, 21].

Les caractéristiques intrinsèques des matériaux composites, comme l'anisotropie, l'hétérogénéité et les importantes disparités de propriétés mécaniques entre les fibres et la résine d'une part, ainsi que les paramètres d'usinage d'autre part, entraînent la formation de divers types de défauts de surface lors du processus d'usinage. Ces défauts comprennent le délaminage, la formation de fissures, la non-coupe des fibres et l'arrachement des fibres [22]. Ce phénomène inclut également le délaminage, la formation de fissures, l'interruption de la coupe des fibres et l'arrachement des fibres [23]. En effet, l'usinage de composites signifie travailler simultanément avec des matériaux distincts, ce qui demande une sélection minutieuse du procédé et de l'outil de coupe. Ainsi que le choix des paramètres de coupe qui influent sur l'état final de la pièce à usiner [24, 25]. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, comprenant d'une part la mise en œuvre du composite Époxy/Alfa, et d'autre part, le détournage à sec des plaques de fibres traitées NaOH (Alfa) et non traitées par une matrice époxy, utilisant un outil en acier rapide (ARS) avec différentes configurations de coupe. Une étude approfondie des caractéristiques d'usinage du matériau composite Époxy/Alfa unidirectionnel a été menée. Par la suite, nous avons réalisé une analyse de variance (ANOVA) pour évaluer l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface lors de l'usinage de la combinaison Époxy/Alfa. Cette analyse a été complétée par l'élaboration d'un modèle de régression entre la variable à expliquer, c'est-à-dire la rugosité, et les variables explicatives, qui sont les paramètres de coupe. Enfin, la modélisation de la rugosité de surface du biocomposite Époxy/Alfa a été effectuée en utilisant une architecture de réseau de neurones optimisée grâce à un algorithme génétique.

Motivation :

Face aux défis environnementaux actuels, l'émergence de matériaux écologiques comme les composites de fibres naturelles se présente comme une alternative crédible aux fibres synthétiques. Ces matériaux offrent des avantages variés, notamment leur disponibilité généralisée, leur coût abordable, leur faible densité, leur biodégradabilité et leur faible impact environnemental. L'étude se concentre sur les composites époxy renforcés avec des fibres d'Alfa (*Stipa tenacissima* L.) visant à comprendre leur usinabilité dans le contexte de l'industrie.

Contexte :

Dans un contexte de recherche axé sur les composites de fibres naturelles, cette étude se penche sur l'usinage spécifique du composite époxy/Alfa. L'objectif est de comprendre et de cerner l'influence des paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité des surfaces usinées. L'utilisation d'outils en acier rapide (ARS) et l'application d'une analyse de variance (ANOVA) contribuent à l'évaluation détaillée de ces paramètres.

Problématique :

La problématique réside dans la complexité de l'usinage des composites époxy/Alfa. Les chercheurs cherchent à comprendre comment les différentes méthodes d'usinage, les orientations des fibres et les traitements chimiques des fibres influent sur la qualité de surface, tout en identifiant les principaux facteurs de rugosité.

Objectifs :

Cette thèse vise à étudier en profondeur le comportement d'usinage du composite époxy/Alfa. Les objectifs principaux incluent l'analyse de l'impact des paramètres de coupe sur la rugosité de surface, la détermination des effets de l'orientation des fibres et des traitements chimiques sur la qualité usinée, et enfin, la mise en place d'un modèle prédictif précis pour la rugosité de surface.

Plan de la Thèse :

Ce travail de recherche s'articule autour de différents axes majeurs. Dans le premier chapitre, une revue exhaustive de la littérature est proposée, mettant en lumière l'état actuel des recherches sur l'usinabilité des composites à base de fibres naturelles. Cette synthèse a permis de positionner ce travail dans le contexte scientifique actuel et a jeté les bases essentielles pour les études ultérieures.

Le deuxième chapitre, axé sur la méthodologie expérimentale, aborde en détail le processus de

fabrication des plaques de composite Epoxy/Alfa, suivi de leur usinage selon un plan d'expérience défini. Ce chapitre expose les paramètres de coupe choisis ainsi que les caractéristiques des outils utilisés pour les opérations d'usinage.

Dans le troisième chapitre, l'étude du comportement à l'usinage du matériau composite unidirectionnel Epoxy/Alfa est approfondie. Cette section analyse en détail l'influence de divers paramètres, qui sont la vitesse de coupe, l'avance et l'orientation des fibres sur la rugosité des surfaces usinées. Les résultats obtenus mettent en évidence des tendances significatives, soulignant l'importance de ces paramètres dans le processus d'usinage.

Le quatrième chapitre se penche sur l'analyse multivariée de la surface des biocomposites époxy/Alfa et des paramètres de coupe. Cette analyse approfondie permet de quantifier l'impact de chaque paramètre sur la rugosité de surface, offrant ainsi des informations cruciales pour l'optimisation des conditions d'usinage.

Enfin, le cinquième chapitre présente la modélisation de la rugosité de surface des biocomposites époxy/Alfa en utilisant une architecture de réseau de neurones optimisée par un algorithme génétique. Cette modélisation avancée offre des perspectives prometteuses pour la prédiction précise de la rugosité de surface en fonction des paramètres de coupe sélectionnés.

In fine une synthèse des principaux résultats est effectuée. En guise de résumé, cette étude offre une compréhension approfondie de l'usinabilité des composites époxy/Alfa. Chaque chapitre, se focalisant sur des aspects spécifiques de l'étude, contribue à une vision globale et détaillée du sujet, ouvrant ainsi la voie à de futures recherches et applications industrielles.

CHAPITRE 1

État de l'art : Étude de l'usinabilité des composites à fibres naturelles

1.1 INTRODUCTION

De nos jours, on observe une utilisation répandue des matériaux composites dans divers secteurs, constituant un défi majeur pour des nombreuses avancées technologiques. Les performances mécaniques exceptionnelles et la capacité à répondre aux exigences des concepteurs sont les traits distinctifs des matériaux composites, cette flexibilité permet d'obtenir les propriétés recherchées en faisant des choix judicieux parmi les composants, modifiant ainsi de manière fondamentale l'approche classique de la conception de structures associée aux matériaux traditionnels [26].

Les performances mécaniques des matériaux composites, notamment en ce qui concerne leurs propriétés spécifiques, les rendent particulièrement attrayants pour diverses applications structurelles. Leur avantage principal réside dans leur anisotropie, une caractéristique que les concepteurs peuvent facilement ajuster pour moduler la rigidité et la résistance en fonction des exigences spécifiques de chaque application. Ce qui les rendent particulièrement bénéfiques, c'est leur capacité à être optimisés pour des utilisations précises en plaçant les matériaux de renforcement de manière stratégique. Ainsi, ils offrent des performances exceptionnelles tout en maintenant un poids réduit. Toutefois, il est important de noter que leurs coûts de production élevés limitent leurs domaines d'application.

Les matériaux composites sont favorisés dans des applications qui mettent l'accent sur des performances élevées, reléguant le coût au second plan. Souvent, ils sont élaborés à l'aide de techniques de moulage avancées pour obtenir des formes complexes. Cependant, la plupart de ces procédés entraînent la formation de bavures sur les contours de la pièce composite et ne permettent pas la création de trous de petit diamètre.

Les opérations d'usinage, comme le perçage et le fraisage des pièces moulées, revêtent une importance cruciale pour plusieurs raisons, lors du processus de fabrication. En outre, l'usinage joue un rôle significatif dans la préparation des surfaces en vue du collage, notamment dans des applications impliquant une variété de matériaux.

Les caractéristiques des matériaux composites, l'anisotropie, l'inhomogénéité, et les disparités mécaniques entre la fibre et la résine, engendrent divers défauts lors de l'usinage. Ces imperfections comprennent le délaminage, les fissures, les fibres non coupées et les fibres cassées,

entraînant ainsi une surface irrégulière. L'usinage des composites équivaut à traiter simultanément des matériaux distincts, nécessitant donc une sélection méticuleuse du procédé d'usinage et des outils de coupe. Ce choix doit être basé sur une analyse approfondie des propriétés mécaniques intrinsèques de chaque matériau constitutif. Dans le cas des composites renforcés de fibres, il est crucial de prendre en compte les propriétés mécaniques des fibres en raison de leur influence prépondérante sur l'état final de la pièce.

Lors de la conception de matériaux composites, il est impératif de prendre en considération les disparités substantielles en termes de résistance physique, thermique et chimique entre la matrice et les fibres. Des recherches approfondies ont été menées sur l'interaction entre les outils de coupe et les matériaux, que ce soit pour les métaux ou les composites à base de fibres de verre et de carbone, dans le but d'identifier les paramètres d'usinage ayant une influence significative sur le comportement des fibres. Il est toutefois essentiel de noter que les études sur l'usinage des composites renforcés de fibres naturelles sont encore lacunaires par rapport à celles portant sur les composites synthétiques. En conséquence, la compréhension du comportement des biocomposites lors de l'usinage demeure incomplète, et les mécanismes physiques impliqués restent indéterminés. Une meilleure appréhension de ces mécanismes facilitera l'identification des paramètres physiques susceptibles d'influencer la transformation des biocomposites au cours du processus d'usinage

1.2 LES MATÉRIAUX COMPOSITES

Les matériaux composites sont principalement constitués de renforts, comme les fibres, qui confèrent au matériau d'excellentes propriétés mécaniques en supportant les charges en traction. Ces renforts sont liés par une matrice, généralement polymérique ou organique, qui assure la cohésion des renforts, transmet les charges, répartit les contraintes en compression entre les fibres, et protège ces dernières de l'environnement extérieur, notamment contre la corrosion. La classification des composites repose souvent sur la nature de leur matrice.

1.2.1 Les matrices

Les matrices prédominantes des composites se divisent en deux catégories principales : les polymères thermoplastiques (tels que le polyamide, le PEEK, le PVC, le polypropylène, etc.) et les résines thermodurcissables (comme l'époxy, le polyester, la mélamine, etc.) [27], ainsi que les élastomères. Les polymères thermoplastiques sont caractérisés par leurs chaînes moléculaires flexibles, leur conférant une résistance relativement faible et un module élastique réduit.

Cependant, ils sont appréciés pour leur ductilité et leur durabilité [28]. En raison de leur température de transition relativement basse, proche de la température ambiante, les composites à base de thermoplastique ont tendance à s'assouplir lors de l'usinage en raison de la chaleur générée par la friction entre l'outil et la matière plastique. Ils peuvent par la suite se déformer ou subir une dégradation chimique à des températures relativement basses, généralement entre 65°C et 100°C, comme c'est le cas pour le polyamide (tableau 1.1) [27].

Les polymères thermodurcissables se caractérisent par leur structure tridimensionnelle fortement réticulée, leur conférant des propriétés mécaniques relativement élevées (tableau 1.1). Ils présentent une dureté notable, impliquant une faible ductilité, mais ils résistent à la chaleur et aux produits chimiques, et ne fondent pas lorsqu'ils sont chauffés [29]. Leur température de transition vitreuse est d'environ 190°C, comme dans le cas de l'époxy 914. Ces matériaux offrent une plus grande souplesse dans la disposition des fibres dans le composite. Cependant, il est essentiel de noter que leur formation est irréversible [30].

Tableau 1.1. Propriétés physiques des résines thermodurcissable et thermoplastique [31]

Matrice résineuse	ρ (Kg/m ³)	E (MPa)	σ max (MPa)	A (%)	T max(C°)	ν (coefficient de poisson)
Thermodurcissable						
Epoxyde	1200	4500	130	2(100% C°)	90 à 200	0.4
Polyester	1200	4000	80	2.5	60 à 200	0.4
polycarbonate	1200	2400	60		120	0.35
Silicone	1100	2200	35		200 à 350	0.5
Thermoplastique						
Polypropylène	900	1200	30	20 à 400	70 à 140	0.4
polyamide	1100	2000	70	200	170	0.35
Polyester sulfone	1350	3000	85	60	180	

1.2.2 Les renforts

Le renforcement est essentiel pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux

composites. Sur le marché, divers types de fibres sont disponibles, adaptés aux considérations de coût de la structure envisagée. Ces renforts à base de fibres se présentent sous différentes formes, incluant des structures linéaires (tels les fils et les mèches), des textiles de surface (comme les tissus et les tapis), ainsi que des structures multidirectionnelles (comme les tresses, les textiles complexes, les tissages tri-directionnels ou plus) [28].

1.3 LES FIBRES NATURELLES

1.3.1 Les fibres animales

Les fibres animales sont catégorisées en fonction de leur origine, la plus importante et couramment utilisée étant la fibre de laine. Elle est reconnue pour ses remarquables propriétés en tant qu'isolant thermique, caractérisées par un pouvoir d'absorption élevé (16-18%) et une élasticité significative (45%) [32]. Bien qu'elles représentent seulement une fraction minime du marché global, soit environ 2% en termes de tonnage par rapport à l'ensemble des fibres textiles utilisées dans le monde, les fibres animales occupent une position économique relativement plus significative. Leurs applications partagent des similitudes notables avec celles des fibres végétales [33].

Les fibres animales incluent :

- Poils : laine (provenant de moutons), alpaga, angora, chameau, cachemire, etc.
- Sécrétions : soie (Bombyx Mori), soie sauvage, fils d'araignée.

Ces fibres sont produites en quantités limitées et sont généralement plus coûteuses que d'autres types de fibres textiles.

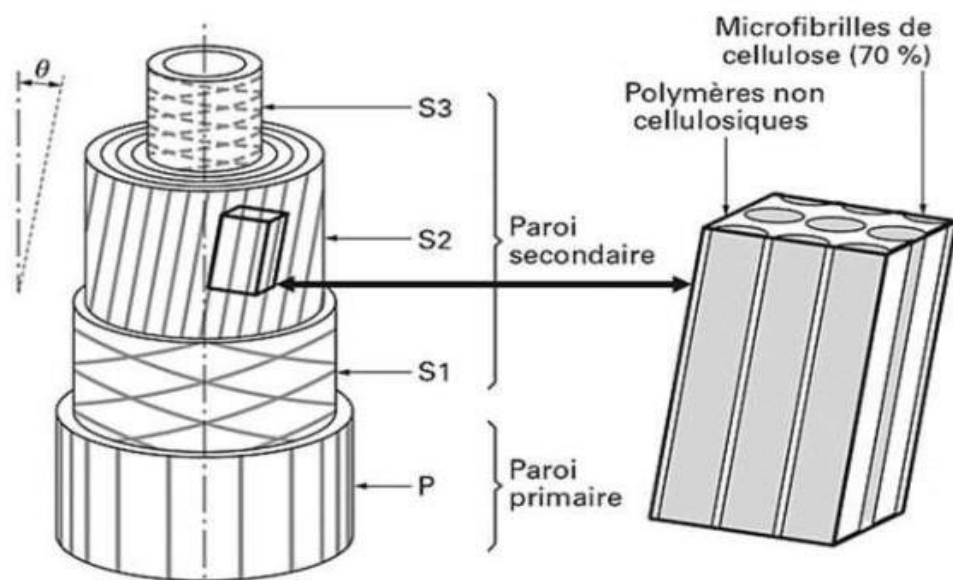
1.3.2 Les fibres minérales

L'amiante représente la seule fibre minérale naturelle, et son attrait pour les fabricants réside dans sa résistance exceptionnelle à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques, ainsi que dans ses propriétés d'absorption. Il a été intégré dans diverses applications, on citera les plaquettes de frein, l'isolation des chaudières et des fours électriques, ainsi que dans divers équipements électriques, dont les cuisinières électriques. Cependant, son utilisation a été progressivement restreinte en raison des risques de cancer associés [34].

1.3.3 Les fibres végétales

Les fibres végétales sont extraites de diverses parties des plantes, sur les fruits, les tiges et les

feuilles, et comprennent principalement la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et la pectine. Ces fibres sont largement utilisées en raison de leurs avantages tels que la légèreté, l'isolation thermique, les excellentes propriétés mécaniques, la biodégradabilité et l'impact positif sur l'environnement. Cependant, il est important de noter que ces fibres présentent une grande variabilité due à des facteurs tels que les conditions agronomiques, le climat, la méthode de défibrage, la morphologie et la composition des fibres. En effet, les propriétés macroscopiques des matériaux d'origine végétale sont fortement influencées par l'organisation structurale, la composition biochimique de la paroi cellulaire et la constitution macromoléculaire (Figure 1.1) [35].



Figures 1.1. Structure d'une fibre végétale. [36]

1.3.4 Classification des fibres végétales

Les fibres végétales peuvent être classées en cinq types en fonction de leur origine (Figure 1.2) : les fibres provenant des poils fins des graines (comme le coton et le kapok), les fibres libériennes extraites de l'écorce des plantes (comme le lin, le chanvre, le jute), les fibres extraites de feuilles (les fibres de sisal et d'abaca), les fibres provenant d'écorces de fruits (la noix de coco) et les fibres résistantes extraites des troncs des plantes.

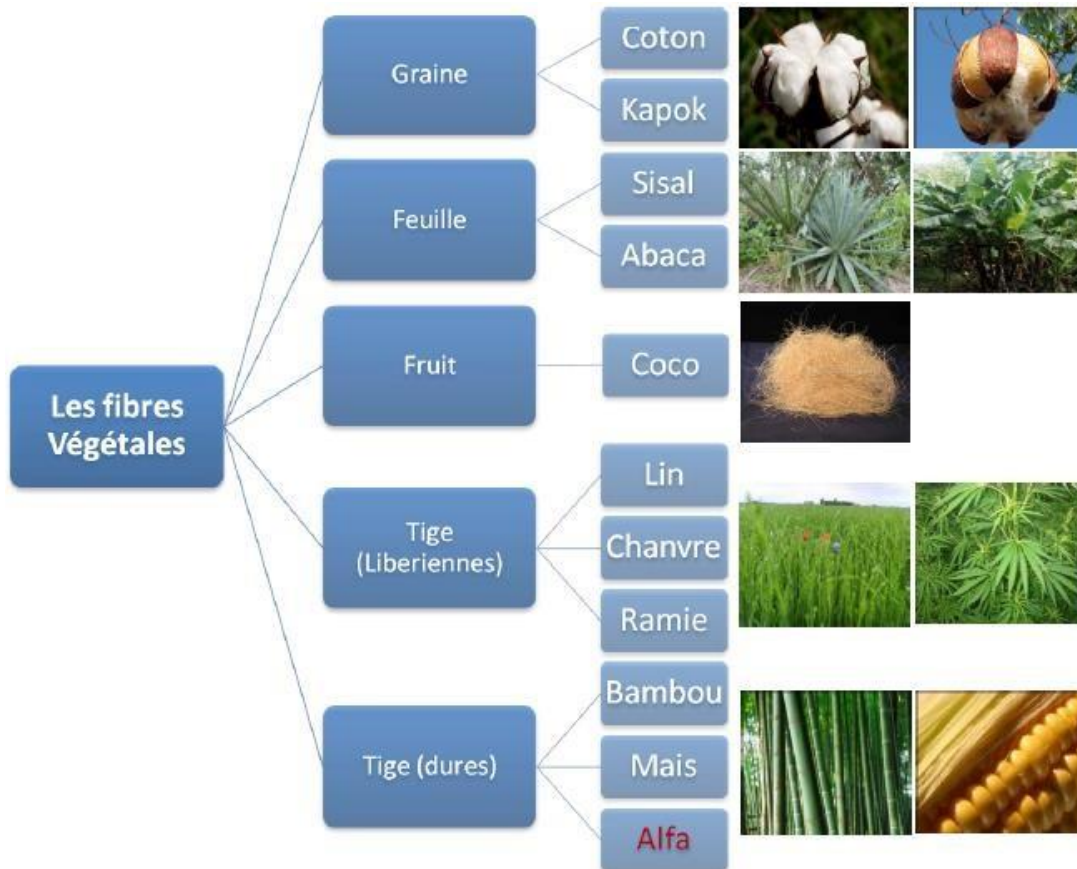


Figure 1.2. Classification des fibres végétales selon l'origine [37]

1.3.5 Propriétés mécaniques des fibres végétales

Les propriétés mécaniques des matériaux composites dépendent des propriétés des composants et de la qualité de l'adhésion entre eux, ainsi que de la répartition des renforts dans la matrice [38].

Déterminer l'impact spécifique de chacun de ces facteurs sur les propriétés mécaniques des composites est souvent très compliqué. Récemment, plusieurs revues ont exploré l'utilisation de fibres de cellulose comme renfort pour les matériaux polymères [39, 40], ainsi que l'utilisation de nanocharges d'origine végétale, notamment des cristaux de nanocellulose et de microfibrilles.

Dans la section suivante, nous passerons en revue les études mettant en évidence divers facteurs qui influencent les propriétés mécaniques des composites de fibres végétales. Nous nous concentrerons particulièrement sur des aspects tels que la morphologie des particules, leur dispersion, le taux de fibres et la qualité de l'interface.

Des aspects importants de la morphologie du renfort peuvent être son facteur de forme et ses

dimensions, car ils influencent la zone de contact entre le renfort et le polymère. Cette augmentation d'interface renforce le transfert de contraintes entre le renfort et la matrice. Ce facteur devient particulièrement complexe avec les fibres végétales en raison de leurs nombreuses liaisons hydrogènes, qui favorisent l'agrégation et la formation de zones de fragilité mécanique.

La manière dont les fibres se répartissent est significativement influencée par leur structure, étant donné que les fibres de grande longueur se répartissent plus difficilement par rapport aux fibres plus courtes. En revanche, des fibres excessivement courtes peuvent résulter en une zone de contact insuffisante entre les fibres et la matrice, ce qui peut compromettre l'efficacité de la transmission des contraintes.

J. Gassan et A.K. Bledzki ont joué un rôle précurseur dans l'amélioration des caractéristiques des matériaux composites renforcés par diverses variétés de fibres d'origine végétale. Leur travail de recherche en 1997 s'est principalement axé sur l'analyse des propriétés mécaniques des composites renforcés par du jute et du polypropylène, en mettant en avant l'influence du traitement de surface des fibres sur ces types de composites [41]. En 1998, une optimisation des propriétés mécaniques du composite jute/époxy a été réalisée grâce à un traitement alcalin des fibres [42]. Un autre composite renforcé par des fibres végétales est le bois composite [43]. Il est constitué de fibres de bois associées à des résines plastiques et trouve des applications variées, notamment dans la construction pour les revêtements, le mobilier urbain, les meubles d'intérieur, et même dans l'industrie aéronautique. Le bois composite est connu pour sa durabilité, sa résistance aux intempéries et au rayonnement solaire.

En 2009, Poilâne a mené une étude [44] mettant en évidence le comportement non linéaire des composites à base de lin et d'époxy. Cette conclusion découle de l'analyse de quatre types de panneaux préimprégnés conçus pour renforcer des fibres de lin unidirectionnelles de différentes épaisseurs, contenant des fibres de 400, 105 ou 42 tex. Les résultats de l'étude révèlent une évolution de la dureté du matériau, passant d'un module d'Young initial à une dureté finale réduite de 40 %. De plus, les observations indiquent que les variations de la dureté, ainsi que les paramètres de dommage tels que la contrainte de rupture, la déformation de rupture et le module d'Young longitudinal, sont directement liés au taux de fibres et inversement proportionnels à l'épaisseur des fils. Il est à noter que les fils de lin de meilleure qualité disponibles dans l'industrie textile ont une épaisseur de 28 tex. Bien que l'utilisation de ces fibres pour la fabrication de préimprégnés soit techniquement complexe, elle semble mériter une exploration approfondie. La diminution de la

rigidité observée dans les composites lin/époxy testés est un aspect notable qui n'a pas encore fait l'objet d'une analyse approfondie dans la littérature existante. Ce phénomène va à l'encontre des propriétés attendues des fibres individuelles et de la résine, ainsi que des fibres constituant le matériau composite. Par conséquent, une analyse détaillée des mécanismes de dommage est essentielle pour mieux comprendre le comportement de ces composites [44].

1.4 APPLICATIONS DES COMPOSITES A FIBRES NATURELLES

Les composites renforcés par des fibres naturelles sont devenus largement utilisés dans divers secteurs tels que l'industrie automobile, la construction, l'aérospatiale, les transports et les sports [45] (tableau 1.2 pour plus de détails). Ce succès a incité l'Union européenne à soutenir le projet ECOSHELL, qui vise à remplacer les fibres synthétiques non durables traditionnellement utilisées dans la structure des véhicules par des biocomposites [46]. Ces matériaux revêtent également une grande importance dans la fabrication de composants non structurels, tels que les revêtements de portières, les dossiers de sièges et les revêtements de coffre, dans l'industrie automobile. Les composites avec une matrice en polyester sont utilisés dans la construction de coques de navires, de panneaux structuraux, de matériaux de construction, de poutres, d'appareils électriques, de réservoirs d'eau et d'équipements sous pression, entre autres applications. De plus, la résine époxy présente un faible taux de retrait après durcissement, garantissant ainsi une précision dimensionnelle accrue [27].

Tableau 1.2. Domaines d'application des composites à fibres naturelles [47]

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

1.5 LES FIBRES D'ALFA

L'alfa, une plante vivace emblématique des régions méditerranéennes, pousse en touffes atteignant environ 1 à 1,20 mètre de hauteur, couvrant de vastes étendues. Elle se développe naturellement dans des environnements arides et semi-arides, souvent marquant les frontières du désert. Les tiges d'alfa sont constituées de filaments de cellulose liés par de la lignine, de la pectine et de l'hémicellulose. Les fibres courtes sont obtenues par un processus d'extraction actif visant à éliminer les agents liants, tandis que pour la fabrication de fils, des fibres longues et flexibles sont extraites.

La répartition géographique actuellement connue est évaluée comme suit [48]

- Algérie : 4 000 000 hectares
- Maroc : 3 186 000 hectares
- Tunisie : 600 000 hectares
- Libye : 350 000 hectares
- Espagne : 300 000 hectares

1.5.1 L'utilisation de la plante d'Alfa

L'Alfa est largement reconnu pour son rôle crucial dans la fabrication de papier et de matériaux composites renforcés, grâce à ses fibres annuelles exceptionnelles. Malgré son processus de raffinage rapide, cette plante parvient à préserver ses caractéristiques

fondamentales, à savoir son volume, sa perméabilité à l'air et une opacité remarquable. Les fibres courtes d'Alfa contribuent à la formation de feuilles bien structurées, agréablement douces au toucher et d'une opacité exceptionnelle. De plus, cette matière première présente une stabilité dimensionnelle [49]. Grâce à sa qualité de formation, sa flexibilité, sa douceur et ses propriétés optiques, cette pulpe convient parfaitement à la production de divers types de papiers fins. Sa capacité à maintenir une stabilité dimensionnelle en fait également un matériau idéal pour la fabrication de papier peint. En outre, la pulpe se distingue par sa faible conductivité, ce qui la rend pertinente dans le domaine électrique [49]. Diverses études ont été menées sur sa composition chimique, l'évolution de sa structure tout au long de son cycle biologique, les possibilités de fabrication de composites, les modifications de surface par des traitements physico-chimiques, le greffage, le blanchiment, ainsi que la production de papier, incluant une analyse de l'impact des différentes étapes sur cette fibre.

Nadji et al. (2006) [50] ont entrepris une analyse approfondie de la structure, de la composition chimique et des propriétés morphologiques des fibres issues de la plante Alfa. De plus, les travaux d'Akchiche et Messaoud (2007) [51] ont examiné les caractéristiques morphologiques comme la longueur, la largeur et la rugosité des fibres d'Alfa en lien avec les conditions de croissance et la biologie végétale [31]. Leurs études ont mis en évidence des variations significatives dans toutes les caractéristiques analysées en fonction du site, de la saison et du niveau de la feuille.

De nombreuses recherches ont été menées sur l'intégration des fibres d'Alfa dans l'industrie de la fabrication de pâtes et de papier, visant à évaluer l'impact des différents traitements sur les propriétés de ces fibres. Bouiri et Amrani (2010) [49] ont constaté qu'un prétraitement acide facilite l'élimination de la lignine des fibres d'alfa et que le blanchiment n'affecte pas significativement les propriétés mécaniques. Marrakchi et al. (2011) [52] ont noté que le raffinage et le blanchiment modifient la morphologie des fibres, influençant ainsi les propriétés du papier. Les propriétés mécaniques s'améliorent grâce au raffinage, rapprochant la pâte d'alfa de l'eucalyptus en raison d'un raccourcissement limité des fibres lors du raffinage.

Les fibres d'alfa dévoilent des propriétés mécaniques attrayantes, suggérant ainsi qu'elles pourraient constituer une alternative prometteuse pour renforcer diverses matrices polymères [53, 54]. L'exploration des caractéristiques morphologiques, physiques et mécaniques révèle que

ces fibres présentent des qualités prometteuses en tant qu'agents de renforcement dans les matériaux composites [55]. Cependant, pour exploiter pleinement leur potentiel en tant que renforts dans les composites, il est essentiel de développer une compréhension approfondie de leur microstructure, de leurs caractéristiques mécaniques, ainsi que de maîtriser de manière efficace le processus d'extraction des fibres et de transformation. À cette fin, Hanana et son équipe, dans leur étude en 2015 [56], ont analysé comment le traitement enzymatique influence la morphologie, la composition chimique et les propriétés mécaniques des fibres d'alfa. Leurs résultats ont révélé une relation entre la composition chimique de ces fibres et leurs caractéristiques mécaniques.

La performance globale d'un matériau composite dépend en grande partie de la qualité de l'interface entre la fibre et la matrice. Plusieurs études se sont penchées sur les aspects liés à cette interface, en particulier entre les fibres d'alfa et certaines matrices polymères [57, 58]. Dans une étude menée par Rokbi et al (2011) [59], l'impact de la concentration et de la durée du traitement alcalin des fibres sur le comportement mécanique des composites en polyester renforcés par des fibres longues d'alfa a été examiné. Ils ont constaté qu'un traitement à base de solution de NaOH à 10 % améliore de manière significative la qualité de l'interface entre la fibre et la matrice, tout en préservant l'intégrité de la fibre au cours du traitement. D'autres recherches ont également suggéré que le traitement au styrène est l'une des méthodes de traitement de surface les plus adaptées pour les fibres d'alfa [58, 60].

Dans une étude similaire, Arrakhiz et al (2012) [61] ont étudié l'effet de trois traitements chimiques différents sur la surface des fibres d'alfa et leur impact sur les propriétés mécaniques et thermiques des composites en polypropylène renforcés par ces fibres. Leur conclusion a montré que le traitement d'estérification améliore de manière significative le module de Young, tandis que les fibres éthérifiées offrent la meilleure stabilité thermique. Une observation au microscope électronique à balayage (MEB) de la morphologie et de la qualité de l'interface entre les fibres d'alfa et la matrice en polypropylène a révélé que le traitement alcalin conduit à une amélioration du module de Young par rapport à la matrice pure [62]. De plus, une analyse récente réalisée par Borchani et al (2015) [63] a examiné les propriétés thermiques et mécaniques de nouveaux biocomposites à base de fibres d'alfa, qu'elles soient traitées ou non, en relation avec leur morphologie. Les résultats ont indiqué que le traitement alcalin se traduit

par une meilleure stabilité thermique, une augmentation de la cristallinité, une surface plus régulière, ainsi qu'une amélioration de la rigidité et de la résistance du biopolymère.

1.5.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des fibres ont une incidence directe sur les composites, ce qui souligne l'importance d'abord appréhender les caractéristiques mécaniques fondamentales des fibres. Il est néanmoins important de noter que ces propriétés peuvent être significativement altérées par divers facteurs tels que l'origine botanique, la variété, ainsi que les conditions de croissance et de récolte.

Tableau 1.3. Les propriétés mécaniques de la fibre d'alfa selon plusieurs sources.

Sources bibliographiques	[58]	[53]	[61]
Densité (g.cm ⁻³)	0.89	1.4	-
Module de Young (GPa)	22	[18.2-24.92]	13.4
Contrainte à la rupture (MPa)	565	[187.6-308]	9.44
Allongement à la rupture (%)	5.8	[1.5-2.4]	-

1.5.3 Caractéristiques et applications des composites à fibres d'Alfa

Les fibres d'Alfa actuelles présentent une composition de 47,63 % de cellulose et une teneur en humidité relative augmentée à 9,79 %. Leurs propriétés mécaniques sont particulièrement prometteuses, avec une densité de 0,89, un module de Young de 22 GPa, une contrainte à la rupture de 565 MPa et un allongement à la rupture de 5,8 %. Ainsi, ces fibres se profilent comme une alternative extrêmement attrayante aux fibres synthétiques [64].

En 2013, F.Z. Arrakhiz et M. Malha [65] ont réalisé une étude approfondie sur l'incorporation de trois types de fibres – Alfa, coco et bagasse – dans le polypropylène. Les conclusions de leur recherche ont été particulièrement frappantes. Il a été mis en évidence que la plus significative amélioration du module de Young, avec une augmentation impressionnante de 75 % par rapport au polypropylène pur, a été obtenue lorsque le mélange contenait une proportion de 30 % de fibres d'Alfa. Cette découverte souligne la capacité exceptionnelle des fibres d'Alfa à renforcer efficacement les composites en polypropylène, ouvrant ainsi la voie à des perspectives

prometteuses pour l'industrie des matériaux composites.

Les utilisations de l'Alfa sont diverses et nombreuses :

- Dans les domaines artisanaux pour la fabrication de paniers, de tapis et de cordes.
- Dans les secteurs industriels pour produire du papier de haute qualité, du papier pour cigarettes et des billets de banque.
- Dans des applications techniques pour les non-tissés et le renforcement des composites.

1.6 USINAGE DES COMPOSITES

Le détournage est un procédé d'usinage visant à enlever de la matière pour définir les bords exposés des matériaux composites. Il s'agit d'une méthode spécifique de fraisage conçue pour obtenir des détails géométriques et des caractéristiques de surface précis. Plusieurs paramètres influent sur la qualité de cet usinage, y compris les propriétés de l'outil, qui sont, le nombre de dents, le diamètre, la longueur utile, l'angle d'hélice, le rayon des arêtes, l'angle de dépouille, l'angle d'attaque et le matériau, ainsi que des constituants liés au matériau à usiner, en l'occurrence, le type de fibres, la nature de la résine, l'orientation des fibres, l'épaisseur du matériau et les additifs présents dans la résine.

De plus, les interactions entre l'outil de coupe et le matériau dépendent fortement des paramètres de coupe, comprenant la vitesse de coupe (V_c), l'avance (V_f) et la longueur d'usinage (L_c) de l'outil. Généralement, deux configurations de détournage sont reconnues : l'usinage "en avalant" et l'usinage "en opposition". La Figure 1.3 illustre différentes situations d'usinage, identifiées dans la littérature comme des facteurs critiques influençant la qualité des surfaces découpées [66].

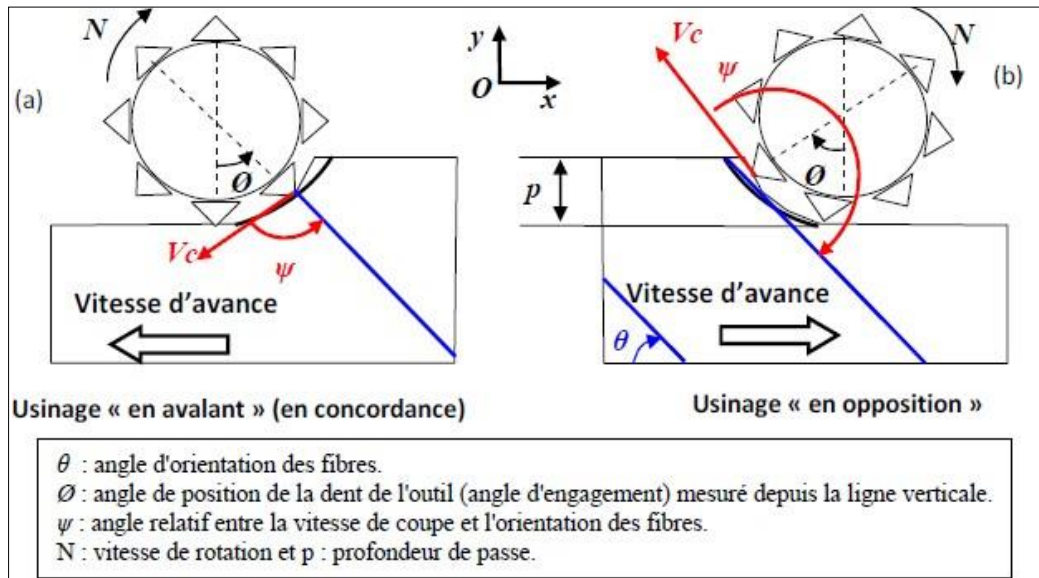


Figure 1.3. Schéma représentant les deux configurations d'usinage par détournage avec (a) fraisage en avalant et (b) fraisage en opposition [66].

1.6.1 Enlèvement de matière par détournage

Les méthodes conventionnelles d'usinage, tels que le tournage, le fraisage et le perçage, sont largement utilisées pour façonner les matériaux composites en raison de la disponibilité des équipements et de la familiarité établie avec ces techniques standards, soutenues par des normes établies. Il est cependant essentiel 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 [27, 67].

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 rigides (la coupe se produit par rupture fragile) [68].

La méthode de découpe des composites varie en fonction de l'orientation des fibres, comme en témoigne l'étude de Ramulu (1997) [69]. Les recherches menées par Li et al. (2016) [70] ont également révélé que l'orientation des fibres, la géométrie de l'outil et les conditions de coupe influent sur le mécanisme de découpe. Ces chercheurs ont identifié divers modes de découpe en fonction des orientations spécifiques des fibres, comme illustré dans la Figure 1.4. 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. En ce qui concerne 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.

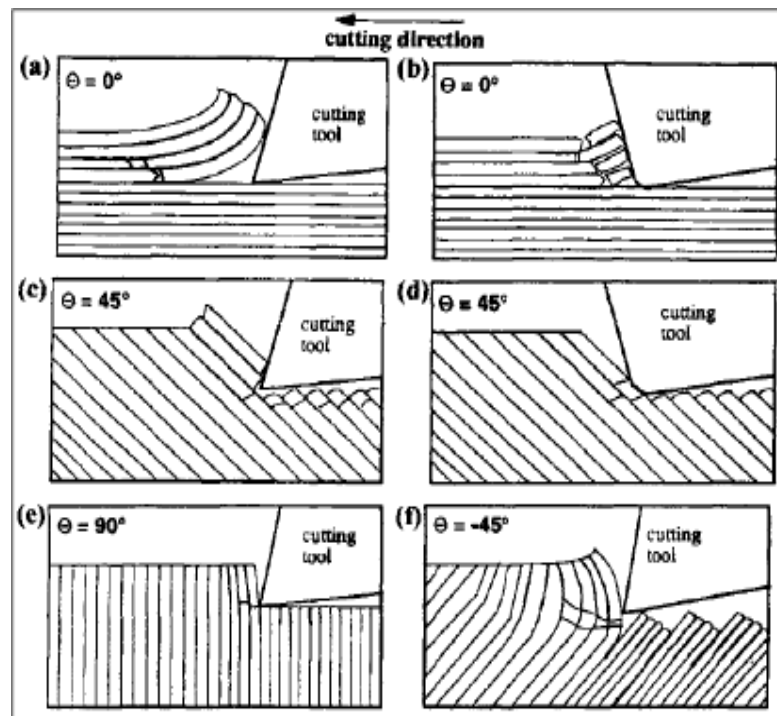


Figure 1.4. Mécanisme de coupe de détournement orthogonal en fonction de l'orientation de plis Unidirectionnels [70].

L'enlèvement de matière est significativement influencé par les caractéristiques du matériau unidirectionnel dans le plan de cisaillement. Lorsque les fibres sont orientées à un angle supérieur à 75° (orientations négatives), la défaillance résulte d'une compression perpendiculaire aux fibres, conjuguée à un cisaillement le long de l'interface fibre/matrice. Cette forme de défaillance peut entraîner des fissures entre les couches du matériau composite, l'arrachement de fibres et une flexion des fibres (voir Figure 1.4) [70].

Les méthodes de production de copeaux, telles qu'expliquées précédemment, s'appliquent de la même manière au fraisage, avec une différence notable : l'angle d'orientation des fibres (θ) évolue continuellement en fonction de la position de l'outil autour de son axe. De plus, l'épaisseur du copeau dépend de l'emplacement de l'outil, en particulier de son bord de coupe. Lors du fraisage en avalant (down milling), l'épaisseur du copeau est maximale au début de l'entrée de l'outil, puis diminue progressivement jusqu'à devenir nulle à la fin. En revanche, lors du fraisage en opposition (up milling), le phénomène est inversé : l'épaisseur du copeau est nulle au début de l'entrée de l'outil et atteint son maximum à la fin [66].

1.6.1.1 Détourage

Le détourage implique l'utilisation des arêtes coupantes de l'outil, tandis que la surface usinée reste alignée avec l'axe de rotation de la fraise. L'outil pénètre dans la pièce dans une direction radiale par rapport à l'hélice (Figure 1.5).

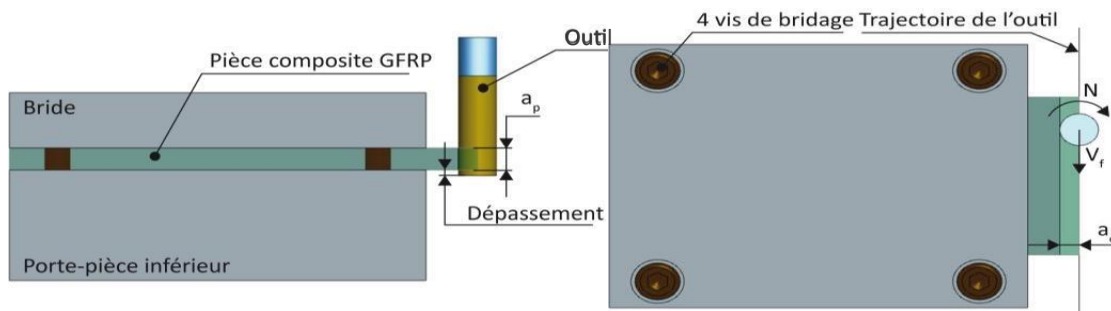


Figure 1.5. Opération de détourage. [71].

V_c : la vitesse de coupe de l'outil (m/min) ; N : la vitesse de rotation de l'outil (tr/min) ; f_z : l'avance par dent de l'outil (mm/dent) ; V_f : la vitesse d'avance travail de l'outil (mm/min) ; φ : l'angle d'orientation de la vitesse d'avance V_f par rapport à l'orientation des fibres ; a_p : la profondeur de passe ou engagement axial de l'outil (mm) ; a_e : l'engagement radial de l'outil (mm) ; D_c : diamètre de coupe = diamètre de l'outil (mm) ; Dep : dépassement (mm) ; F_c : l'effort de coupe (N).

1.6.1.2 Détourage des matériaux composites à fibres synthétiques

Les matériaux fréquemment utilisés sont les composites fabriqués à partir de fibres longues et d'une matrice polymère, communément appelés FRP (Fiber Reinforced Polymer) par leur acronyme. Les deux catégories les plus répandues comprennent :

- Les matériaux composites à matrice polymère renforcés de fibres de carbone (CFRP).
- Les matériaux composites à matrice polymère renforcés avec des fibres de verre (GFRP).

Le détourage implique l'utilisation des bords tranchants situés sur le pourtour de l'outil, et la surface qui est usinée reste parallèle à son axe de rotation de la fraise. En ce qui concerne la pénétration dans la pièce à usiner, celle-ci se fait dans la direction radiale de l'hélice.

Pour obtenir une pièce en matériau composite, le processus requiert deux phases distinctes. La première étape englobe la création du composite lui-même, au cours de laquelle la forme finale de la pièce prend forme avec des dimensions relativement précises. La phase suivante, appelée parachèvement, intervient ensuite. Cette étape vise à ajuster les dimensions de la pièce conformément aux spécifications requises, tout en incluant la conception de géométries supplémentaires indispensables à la manière dont la pièce est utilisée, à savoir, les trous de passage, les poches et les évidements.

L'usinage des pièces en composites représente un défi majeur, consistant à concilier une qualité satisfaisante (précision des dimensions, état de surface, élimination des délaminations et des résidus de fibres, entre autres) avec une productivité adéquate (vitesse d'exécution, coûts des outils, etc.). Face aux obstacles liés à la réalisation de pièces finies de haute qualité, il est crucial de déterminer de manière précise les réglages optimaux des paramètres à appliquer en fonction du matériau à usiner. Cette approche vise à garantir l'obtention de la qualité de surface souhaitée.

1.6.1.2.1 L'usinage composites à matrice polymère renforcés de fibres de carbone (CFRP)

De nombreuses études se focalisent sur l'amélioration du processus de parachèvement par usinage afin d'optimiser les performances des composites. Les recherches portant sur la coupe orthogonale des composites en carbone/époxy ont mis en évidence l'influence de divers paramètres sur les forces de coupe et les caractéristiques du produit final.

L'orientation des fibres joue un rôle crucial dans la qualité de la surface usinée et la formation des copeaux lors de l'usinage de composites unidirectionnels [72]. À un angle de 0° , des copeaux volumineux et fragmentés se forment, mais à mesure que l'orientation des fibres augmente, ces copeaux deviennent plus petits. À 45° , les copeaux fragmentés évoluent vers des morceaux plus petits, et à 90° , des copeaux discontinus sous forme de poudre se forment. Cette variation d'orientation des fibres a un impact significatif sur les forces de coupe [73]. La force de coupe augmente progressivement jusqu'à ce que l'orientation des fibres atteigne 75° , puis augmente brusquement à 90° . Cependant, la force de poussée augmente jusqu'à 15° , puis reste relativement constante jusqu'à 75° . Ces observations soulignent une contradiction : la force de poussée diminue lorsque l'orientation des fibres varie de 0° à 75° [73].

La profondeur de coupe (ap) joue également un rôle important dans le processus d'usinage. Des recherches menées par Turki et al. (2001) sur l'usinage de composites en carbone/époxy en coupe orthogonale ont révélé que les forces de coupe et de poussée évoluent presque linéairement en fonction de cette valeur. Ils ont observé une augmentation d'environ 29 % lorsque on varie de 0,1 mm à 0,2 mm. Ces résultats ont été confirmés numériquement à l'aide d'un modèle tridimensionnel basé sur la méthode des éléments finis, et des recherches ultérieures ont corroboré ces constatations (Santo et al., 1998) [74].

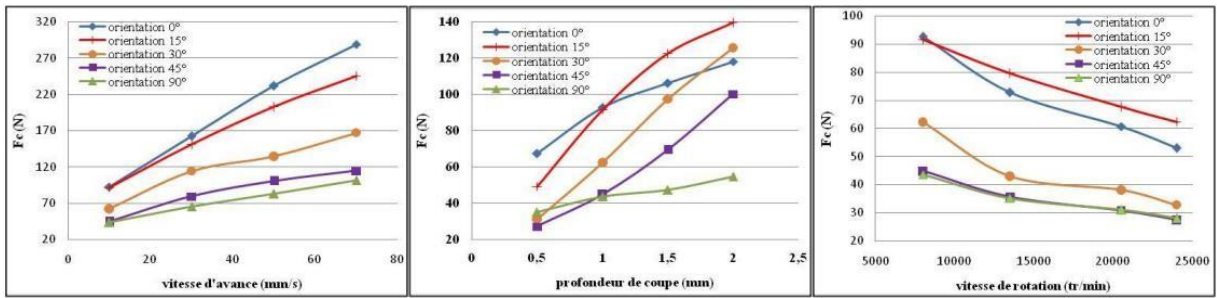
Dans une étude plus récente, Turki (2014) [75] a examiné l'influence de quatre variables sur la force de coupe lors de l'usinage de composites composés de fibres de carbone et de résine époxy. Ces variables comprenaient l'orientation des fibres, la vitesse d'avance, la vitesse de rotation de la broche et la profondeur de passe. Les résultats indiquent que la force de coupe augmente proportionnellement avec la vitesse d'avance et la profondeur de passe, mais diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation de la broche. De plus, il est noté que ces paramètres de coupe ont une influence moindre sur la force de coupe à mesure que l'orientation des fibres

augmente.

Dans l'étude menée par Slamani et al. (2019) [76], les chercheurs ont analysé les paramètres d'usinage des bords de polymères renforcés de fibres de carbone à haute vitesse. Leurs résultats ont révélé plusieurs conclusions importantes. Tout d'abord, ils ont constaté que la vitesse d'avance est le paramètre le plus critique, ayant un impact significatif sur les forces de coupe normales et axiales. En revanche, l'effet de la vitesse de coupe s'est avéré presque négligeable dans cette étude.

Une observation intéressante était que l'effet de la vitesse d'avance et la force d'avance était moins important que celui de la vitesse de coupe. Cependant, l'effet d'interaction de l'avance de coupe a été identifié comme ayant la plus grande importance statistique parmi les paramètres étudiés. Les chercheurs ont également réalisé des tests préliminaires utilisant l'analyse de la variance (ANOVA) pour évaluer les facteurs influant sur la rugosité de surface. Les résultats de ces tests ont montré que l'effet d'interaction entre la vitesse de coupe et la vitesse d'avance contribuait de manière significative à la rugosité de surface observée. Ces découvertes soulignent l'importance de comprendre ces paramètres d'usinage pour optimiser le processus et obtenir des résultats de qualité dans le travail des polymères renforcés de fibres de carbone à haute vitesse.

Turki et al. (2011) [72], ont réalisé une technique de fraisage de profil, communément appelée détournage, sans avoir recours à un lubrifiant. Cette méthode implique l'utilisation d'une fraise en carbure monobloc à deux dents de 6 mm de diamètre. Les opérations de fraisage ont été menées sur des éprouvettes mesurant 100 x 100 mm². L'étude a exploré cinq angles différents de disposition des fibres (0°, 15°, 30°, 45° et 90°) pour le fraisage en avalant. De plus, deux orientations des fibres (0° et 90°) ont été analysées pour le fraisage en opposition. Les angles de disposition ont été mesurés par rapport à la direction d'avancement de l'outil. Les valeurs des paramètres de coupe utilisés pour les deux techniques de fraisage sont détaillées dans la figure 1.6.



a) ($N = 8000$ tr/min et $a_p = 1$ mm) b) ($N = 8000$ tr/min et $V_f = 10$ mm/s) c) ($V_f = 10$ mm/s et $a_p = 1$ mm)

Figure 1.6. Variation de l'effort de coupe pendant l'opération de détournage en avalant en fonction de a) la vitesse d'avance b) la profondeur de passe et c) la vitesse de rotation [72].

Leur étude a révélé plusieurs conclusions significatives concernant l'usinage des composites. L'effort de coupe (F_c) augmente de manière linéaire à mesure que la vitesse d'avance augmente, se multipliant par plus de trois dans la plage de vitesse de 10 à 70 mm.s⁻¹ pour une orientation des fibres à 0°, et par plus de 2 pour une orientation de 90°. De plus, l'effort de coupe augmente considérablement avec l'augmentation de la profondeur de passe, particulièrement jusqu'à l'orientation de 45°, où il est multiplié par environ trois pour des profondeurs de passe allant de 0,5 à 2 mm. Toutefois, pour l'orientation de 90°, cette augmentation n'est que d'environ 1,5 fois. Une observation intéressante est la diminution de l'effort de coupe à mesure que la vitesse de rotation de la broche augmente, soulignant ainsi l'importance cruciale de divers paramètres dans le processus d'usinage des composites.

Berube (2012) [77] a conduit une étude approfondie sur l'impact de la géométrie des outils de coupe sur l'usinage des composites. Quatre outils à plaquettes diamant polycristallin de formes différentes ont été utilisés pour explorer les effets des paramètres géométriques tels que l'angle d'attaque de l'arête tranchante et l'angle d'hélice de l'outil. L'expérimentation a été réalisée sur des séquences de 24, 32 et 40 plis de matériau composite carbone/époxy. Les mesures, effectuées à l'aide d'un profilomètre, ont permis d'évaluer la rugosité en fonction de l'orientation des fibres.

Les résultats ont montré que les efforts de coupe moyens dans la direction de l'avance augmentent proportionnellement à la vitesse d'avance. En revanche, les efforts de coupe moyens dans la direction perpendiculaire à la surface usinée sont liés à la vitesse de coupe et à la vitesse d'avance. De plus, les efforts de coupe dans la direction axiale sont également proportionnels à la

vitesse de coupe et à la vitesse d'avance.

En ce qui concerne la rugosité des surfaces usinées, elle varie de 0.8 à 12.5 microns pour les quatre outils testés lors de la première expérimentation. L'orientation des fibres s'est révélée être un facteur significatif influençant la rugosité, même avec des paramètres de coupe constants. Notamment, les fibres orientées à -45 degrés présentent une rugosité (Ra et Rt) de 2 à 7 fois supérieure à celle des fibres orientées à 0 degrés. Ces résultats soulignent l'importance cruciale de la géométrie de l'outil et de l'orientation des fibres dans l'obtention de surfaces usinées de qualité dans le domaine des composites.

En 2015, Mullier et Chatelain [78] ont réalisé une étude approfondie sur un matériau stratifié multidirectionnel CFRP composé de 24 couches, formant une plaque d'une épaisseur moyenne de 3,6 mm. La configuration du stratifié comprenait une séquence de superposition spécifique [(90°, -45°, 45°, -45°, 45°, -45°, 0, -45°, 45°, 90°)] s, où les fibres représentaient 60% du volume total. Les opérations d'usinage ont été effectuées à l'aide de fraises en bout revêtues de diamant CVD comportant six cannelures, avec un diamètre de 9,5 mm. Pendant l'usinage, la température de coupe a été surveillée à l'aide de deux thermocouples de type K intégrés.

L'objectif principal de l'étude de Mullier et Chatelain était d'établir une corrélation entre la température de coupe, l'usure des outils et leur impact sur les propriétés mécaniques du matériau. Les expériences ont été réalisées en maintenant les paramètres de coupe constants pour un même outil et un même stratifié, comprenant une avance de 1140 mm/min, une vitesse de coupe de 300 m/min et une vitesse de rotation de la broche de 1000 tr/min.

Deux approches ont été utilisées dans cette étude. La première a consisté à altérer la température de coupe en préchauffant les outils avec un chalumeau, en variant les niveaux de préchauffage et en observant l'usure des outils sur deux séries distinctes d'échantillons. La seconde approche a examiné les effets de la température de coupe et de l'usure des outils en utilisant des outils présentant différents degrés d'usure, tout en maintenant la température de préchauffage constante.

Les résultats ont montré que l'utilisation d'outils neufs a entraîné des dommages constants sur le stratifié, modifiant ainsi la température de coupe. Cependant, cette élévation de température n'a pas eu d'impact significatif sur les propriétés mécaniques des échantillons testés en flexion en faisceau court ou en flexion trois points, même à des températures élevées.

Tableau 1.4. Paramètre des échantillons de faisceaux courts (outils usés) [78]

Outils usés	Bande n°	Température par chauffe (c°)	Nombre d'échantillons produits
F1S3	S9	280	12(S91..S912)
Vb=35µm			
F2S2	S10	270	12(S101..S1012)
Vb=50µm			
F3S1	S11	270	12(S111..S1112)
Vb=30µm			
Paramètre de coupe	Vc =300m/min	Vf=1140mm/min	Total =36

L'étude a révélé une réduction de la résistance globale du matériau et un impact négatif de la température lors du processus de découpe. Le mode de rupture des échantillons variait en fonction de la configuration de chargement. Dans les tests de flexion en trois points, la rupture résultait de la séparation interlaminaire de la couche de surface supérieure dans la zone de chargement. En revanche, dans les échantillons de faisceau court, la rupture survenait lors de la propagation d'une fissure vers le centre de l'échantillon, le long d'une couche orientée à -45° . Ces observations sont détaillées dans le tableau 1.4 et la figure 1.7.

Dans le premier cas, l'augmentation de la détérioration de la résine au niveau des couches de surface, près de la zone de découpe, pourrait être responsable de la réduction de la résistance mécanique. Lorsque la couche de surface supérieure se fracture en premier lieu, il est logique de supposer que le premier échantillon, soumis à un test de flexion en trois points, afficherait une résistance supérieure à celle du deuxième échantillon pour une largeur de bande donnée. Dans le deuxième cas, une carbonisation excessive des plis à un angle de -45° ainsi que des dommages généralisés provoqués par l'usinage pourraient faciliter l'amorçage de fissures, expliquant ainsi la

réduction maximale de la résistance interlaminaire en mode cisaillement (ILSS) par rapport aux échantillons usinés avec des outils neufs.

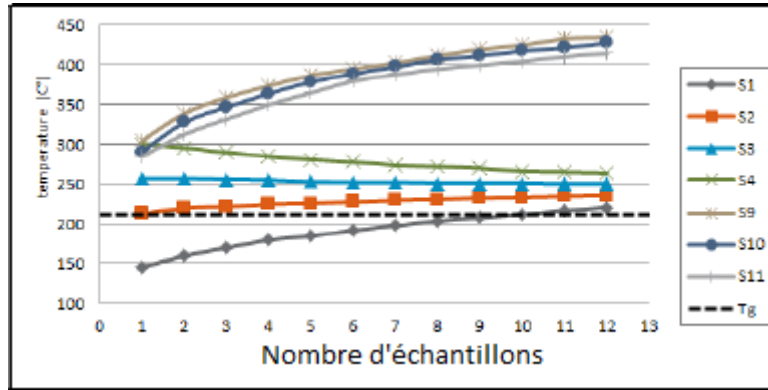


Figure 1.7. Température de coupe des échantillons de faisceaux courts (outils neufs et usés) [78].

En 2017, une étude menée par Delahaigue et al. [79] visait à évaluer l'influence des paramètres de coupe sur les caractéristiques mécaniques des composites carbone/époxy soumis à une traction uniaxiale. Pour ce faire, des échantillons de dimensions 3,6 x 12 x 250 mm et 3,6 x 6 x 250 mm, constitués d'un matériau composite laminé quasi-isotrope de 24 plis, ont été usinés en utilisant deux types d'outils : des outils neufs et des outils usés. Lors de l'opération de découpe avec l'outil neuf (comme illustré dans la figure 1.8), un préchauffage à 350°C était nécessaire pour maintenir une température de coupe stable d'environ 300°C, restant relativement constante tout au long de l'expérience. En revanche, pour l'outil usé, un préchauffage de 400°C était requis pour atteindre une température de coupe de 475°C.

Les mesures ont révélé que la température de transition vitreuse de la résine avait été largement dépassée le long du bord de coupe des échantillons. L'examen minutieux de la surface de coupe à l'aide d'une loupe binoculaire a montré une netteté remarquable de la surface et une distinction claire entre les plis dans les zones usinées avec l'outil neuf. Les plis orientés à -45° ont montré les dommages mécaniques les plus prononcés. De plus, aucune indication significative de dommage thermique n'a été relevée à la surface. Cette observation peut s'expliquer par le fait que la chaleur générée lors de la coupe est dissipée efficacement par l'outil et les copeaux, limitant ainsi le transfert de chaleur vers la pièce elle-même.

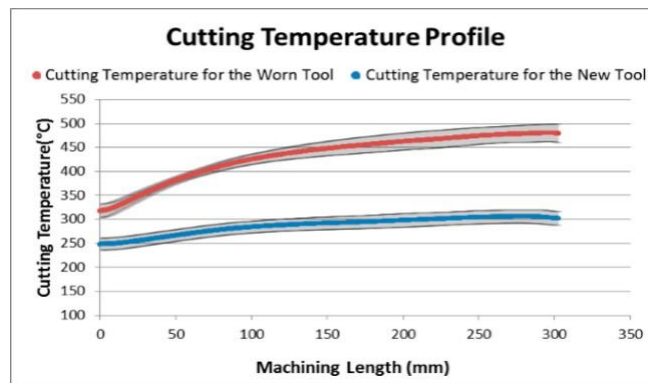


Figure 1.8. Profils moyennés des températures de coupe [79].

Pour les échantillons usinés à l'aide de l'outil usé, ils ont observé une surface relativement homogène, sans distinction claire entre les différentes couches du matériau. Ils ont noté que la température de transition vitreuse de la matrice époxy avait été considérablement dépassée à la surface usinée. Cette surchauffe a entraîné une dégradation et un ramollissement de la matrice époxy, provoquant son étalement et la formation d'une surface de coupe uniforme et lisse, comme indiqué par les auteurs de l'étude. De plus, des fibres déchirées ainsi que des fibres non coupées ont été observées aux angles de 0° et -45° sur les échantillons usinés avec des outils usés, utilisant la technique d'usinage en avalant, comme illustré dans la figure 1.9. Ces observations mettent en évidence l'impact significatif des paramètres de coupe et de l'usure des outils sur la qualité et l'intégrité des surfaces usinées dans le cas des composites carbone/époxy.

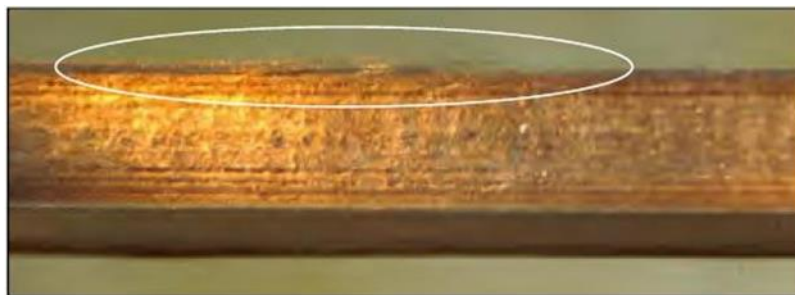


Figure 1.9. Fibres non coupées [79].

Dans l'étude menée par EL Ghaoui en 2019 [80], l'impact de l'introduction de nanoparticules dans les composites à matrice époxy a été minutieusement examiné. Pour ce faire, des plaques en composite de fibres de carbone renforcées de résine époxy (CFRP) ont été élaborées, intégrant de la nanoargile organique, de la cire et un agent mouillant. Des essais d'usinage ont été réalisés à l'aide d'outils en diamant polycristallin (PCD) équipés de thermocouples pour évaluer l'usinabilité

du CFRP ainsi modifié. Parallèlement, des essais mécaniques ont été entrepris afin d'analyser toute modification éventuelle des propriétés mécaniques du matériau.

L'incorporation d'une concentration de 2% en poids d'argile organique a significativement amélioré l'interface entre les fibres et la matrice du CFRP, entraînant une augmentation d'environ 7% de la résistance au cisaillement inter-laminaire. Malgré des outils parfaitement affûtés, les températures des outils ont rapidement dépassé le seuil de transition vitreuse de la matrice, mettant en évidence les défis thermiques inhérents à l'usinage de ces matériaux composites modifiés.

L'ajout de 1% en poids de cire dans la matrice époxy a conduit à une réduction significative des forces de coupe et des températures, tandis que l'effet de l'argile organique était moins marqué. La combinaison optimale de 2% d'argile organique, 1% de cire et 1% d'agent mouillant a engendré une réduction notable des forces d'avance de 37%, des forces normales de 15% et des températures de coupe abaissées de 18 °C.

Ces résultats ont souligné l'amélioration de l'usinabilité des stratifiés composites modifiés tout en préservant leurs propriétés mécaniques, offrant ainsi des perspectives prometteuses pour l'application de ces matériaux dans divers domaines de l'industrie.

Slamani et al. (2018) [76] ont mené une étude approfondie sur l'usinage d'un autoclave stratifié CFRP composé de 24 couches en utilisant un outil en carbure de diamant revêtu en dépôt chimique en phase vapeur (CVD) avec six cannelures droites. L'objectif principal de leur recherche était d'évaluer l'influence des paramètres d'usinage sur la qualité de la surface lors de la découpe à grande vitesse de polymères renforcés de fibres de carbone. Ils ont conclu que parmi les paramètres étudiés, la vitesse d'avance est le paramètre le plus déterminant, ayant un impact significatif sur les forces de coupe normales et axiales. En revanche, l'effet de la vitesse de coupe se révèle presque négligeable. De plus, l'influence de l'avance sur la force d'avance est moins marquée que celle de la vitesse de coupe. Ils ont également constaté que l'interaction entre la vitesse d'avance et la vitesse de coupe possède la signification statistique la plus significative, et cette interaction est le facteur prédominant dans son incidence sur la rugosité de surface (Figure 1.10). Les modèles de régression qu'ils ont développés pour la force de coupe normale et la force de coupe axiale sont exprimés par les équations (1.1) et (1.2) respectivement.

$$F_N = 71 + 82,87 \cdot 10^{-3} \cdot f - 153,86 \cdot 10^{-3} \cdot V_c - 9,641 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot V_c \quad (1.1)$$

$$F_a = -4,55 - 19,03 \cdot 10^{-3} \cdot f + 13,66 \cdot 10^{-3} \cdot V_c + 3,15 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot V_c \quad (1.2)$$

Le modèle estimé de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance est présenté dans l'équation (1.3).

$$F_f = -213,88 + 32,15 \cdot 10^{-3} \cdot f + 445,33 \cdot 10^{-3} \cdot V_c - 18,50 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot V_c \quad (1.3)$$

L'illustration de la validité de leurs modèles est clairement présentée dans la figure (1.11).

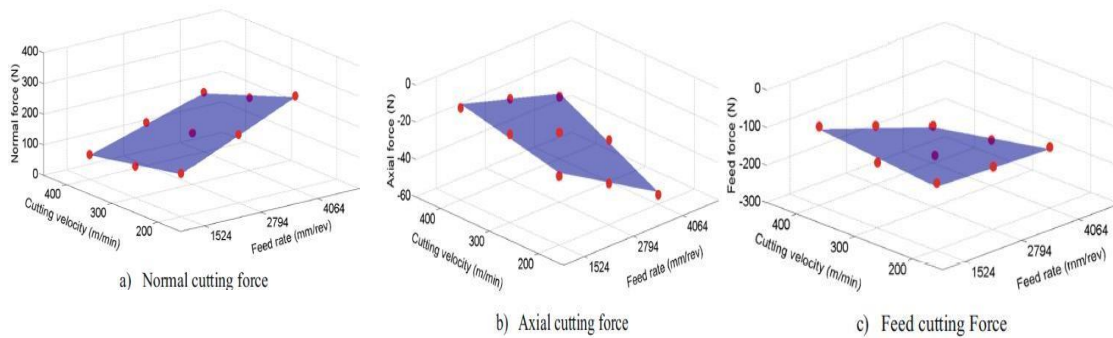


Figure 1.10. Valeurs mesurées par rapport aux valeurs prévues des composantes de la force de coupe [76].

Hamedanianpour et Chatelain (2013) [81] ont examiné les conséquences de l'usure des outils de coupe sur la qualité de découpe des composites haute performance en fibre de carbone-époxy (CFRP) largement utilisés dans l'industrie aérosapiale. Leur étude a évalué divers critères de qualité, notamment la rugosité de la surface et l'intégrité du matériau résultant de la découpe, tels que la présence de fibres non coupées, les déchirures des fibres, le délaminage et les dommages causés par la chaleur à la matrice. Ils ont utilisé un outil en carbure diamanté (CVD) équipé de six arêtes de coupe et d'un diamètre de 9.53 mm pour découper des stratifiés de 24 couches conçus pour présenter des propriétés quasi-isotropes.

Leurs observations ont révélé que l'usure de l'outil entraînait des forces de coupe élevées et une qualité de surface inférieure en termes d'intégrité. Une mauvaise intégrité de surface, incluant la fissuration de la matrice, l'extraction des fibres et des trous vides, a été particulièrement notée pour les plis à -45° . Ils ont constaté que des vitesses d'avance plus basses et des vitesses de coupe plus élevées conduisaient à une usure moindre de l'outil, tandis qu'une usure plus importante était observée à des valeurs d'avance et de vitesse de coupe intermédiaires. Malgré les tests de durée de vie de l'outil, aucune observation d'arrachement ou de délaminage des fibres à la surface de tous les coupons coupés n'a été notée. Cependant, à la fin de ces tests, une usure excessive de l'outil a entraîné

une brûlure de la matrice accompagnée de fumée et d'une odeur âcre pendant l'usinage. Les bords coupés ont montré une brûlure de la résine époxy en raison de l'usure élevée des outils et des forces de coupe élevées (figure 1.11).

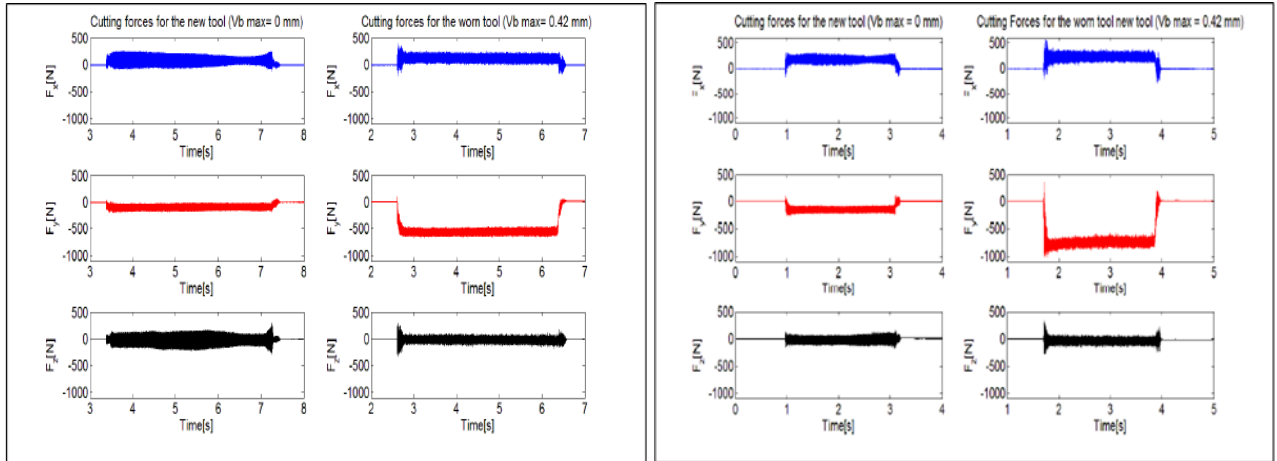


Figure 1.11. Forces enregistrées dans les directions x, y et z à l'aide d'outil neuf et usé dans le test 1 (Avance: 1524 mm / min, vitesse: 400 m / min) et Test 2 (Avance: 2794 mm / min, Vitesse: 300 m / min) [81].

1.6.1.2 L'usinage composites à matrice polymère renforcés avec des fibres de verre GFRP (Glass Fiber Reinforced polymer).

L'étude menée par Collaine et al. En 2017 [71] s'est concentrée sur une série de tests de découpe de composites GFRP, évaluant différentes méthodes de coupe. Ils ont examiné l'influence de l'orientation des fibres ainsi que des paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe (V_c) et l'avance par dent (f_z) sur la qualité des surfaces obtenues.

Trois types d'outils ont été utilisés, dont l'un était équipé d'une double hélice pour prévenir le délaminage, tandis que les deux autres avaient une denture en diamant, se distinguant par leurs revêtements respectifs. Lors de chaque essai, les chercheurs ont mesuré l'état de la surface à l'aide d'un rugosimètre, notant les valeurs de R_z et R_a (exprimées en micromètres), en fonction de deux orientations d'usinage : parallèle et perpendiculaire au sens des fibres (0° et 90°), comme illustré dans la figure 1.12.

Au cours des essais de découpe, plusieurs constatations ont été faites, comme indiqué dans le tableau 1.5. Les principaux résultats de l'étude sont les suivants :

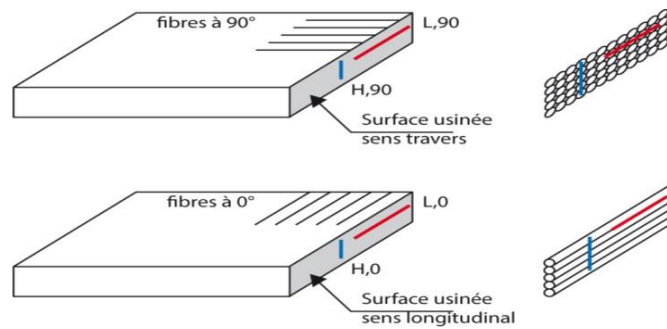


Figure 1.12. Présentation des éprouvettes et situation des mesures d'état de surface [71].

Lorsque la découpe est effectuée dans le sens parallèle aux fibres, elle ne provoque généralement pas de vibrations. Cependant, une variation des paramètres de coupe peut rapidement affecter la qualité de la surface en raison du déchirement des fibres (figure 1.13). En revanche, lorsque la découpe se fait perpendiculairement aux fibres, elle tend à produire des bords plus nets. Toutefois, un choix inadéquat des paramètres de coupe peut facilement entraîner des vibrations (figure 1.14). Ces vibrations sont préjudiciables à la qualité de la surface et peuvent accélérer l'usure prématurée de l'outil.

Tableau1.5. Conditions de coupe de base [71].

Direction usinage	outil	ae	V_c (m/min)	fz (mm/dent)	N (tr/ min)	V_f (mm/min)
0°	T1			0,06		2165
	T2	0,5		0,03		2706
			170		9019	
90°	T3					
	T1			0,06		2165
	T2	0,1		0,03		2706
	T3					

En ce qui concerne l'influence des paramètres de coupe, il est à noter que l'augmentation de l'avance par dent fz a un effet négatif sur la qualité de la surface. En ce qui concerne les vitesses de coupe, il apparaît que la plage moyenne est la plus propice pour obtenir des résultats optimaux, tant du point de vue des mesures que de l'apparence de la surface.

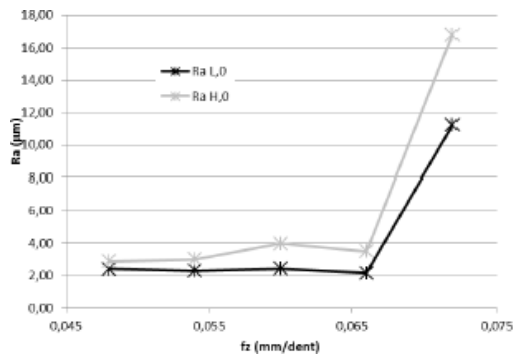


Figure 1.13 : Evolution de Ra à 0° en fonction de f_z [71]

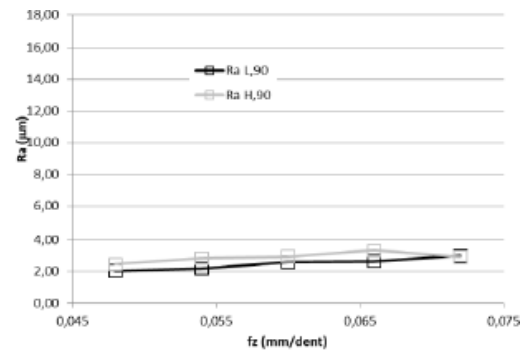


Figure 1.14. : Evolution de Ra à 90° en fonction de f_z [71]

1.6.1.3 Détourage des composites à fibre naturelle

Bien que de nombreuses études aient été consacrées au développement des procédés de fabrication de composites, il est regrettable de constater que la recherche sur les méthodes de parachèvement reste limitée, en particulier dans le contexte des composites renforcés de fibres naturelles (NFRP). Les travaux antérieurs ont clairement établi l'importance cruciale de l'avance sur la qualité de la surface, indépendamment du type de procédé d'usinage utilisé [82-84], tandis que la vitesse de coupe et la profondeur de passe peuvent également influencer la qualité de la surface obtenue [82, 85].

Dans une étude menée par Babu et al. En 2013 [86], l'usinabilité en détourage de trois types de composites NFRP unidirectionnels différents a été rigoureusement analysée : le composite à base de fibres de banane et de polyester (BFRP), le composite à base de chanvre et de polyester (HFRP) et le composite à base de jute et de polyester (JFRP). Ces matériaux ont été comparés à un composite verre/polyester (GFRP) avec un rapport volumique de fibres de 0,52.

L'objectif principal de leur recherche était d'explorer l'impact de la vitesse de coupe et de l'avance, tout en maintenant la profondeur de coupe constante, sur le coefficient de délaminage et la rugosité des surfaces usinées lors du fraisage à sec. Pour ce faire, ils ont utilisé une fraise en carbure brasé de 5 mm de diamètre. Les niveaux des facteurs examinés ont été minutieusement répertoriés (Tableau 1.6).

Tableau 1.6. Niveaux des facteurs de l'expérience de [86].

Paramètres	Niveau -1	Niveau 0	Niveau +1
Vitesse de coupe (m.min ⁻¹)	16	24	32
Vitesse d'avance (mm.rév ⁻¹)	0.1	0.2	0.30

Les conclusions de leur étude ont révélé que le facteur de délaminage (Fd) ainsi que la rugosité arithmétique de la pièce finie (Ra) diminuaient avec l'augmentation de la vitesse de coupe, mais augmentaient avec l'accroissement de la vitesse d'avance. Ces paramètres ont montré une influence significative sur le délaminage et la rugosité de la surface, avec la vitesse d'avance ayant une contribution nettement plus importante, environ 2 à 3 fois supérieure à celle de la vitesse de coupe. Par conséquent, l'usinage à une vitesse de coupe élevée et une vitesse d'avance réduite a entraîné une amélioration notable de la qualité de la surface finie et une réduction du délaminage.

De plus, les chercheurs ont développé un modèle mathématique détaillé décrivant la manière dont la rugosité et le taux de délaminage évoluent en fonction des vitesses de coupe et d'avance, grâce à une analyse de régression linéaire multiple. Les résultats ont suggéré que la qualité du détournage des pièces en NFRP était comparable à celle des composites renforcés de fibres de verre (GFRP). Parmi les quatre matériaux examinés, le composite HFRP s'est démarqué en présentant une rugosité plus faible (Ra) et un facteur de délaminage (Fd) réduit par rapport aux autres NFRP ainsi qu'au GFRP. Ces constatations ouvrent la voie à l'utilisation potentielle des composites NFRP en substitution aux GFRP dans des applications requérant une finition de surface exceptionnelle.

En 2015, Delahaigue [47] a mené des expériences en utilisant deux types d'outils, à savoir le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et le diamant polycristallin (PCD), tout en variant les paramètres de découpe dans une plage préétablie.

Ces paramètres comprenaient la vitesse de découpe, l'avance et l'orientation des fibres du matériau. Ils ont été évalués en fonction de deux critères clés : l'effort requis pour la découpe et la qualité de la surface obtenue.

Suite à une analyse approfondie des résultats, il a été constaté que le matériau composite lin/époxy présente une capacité de découpe satisfaisante, surtout lorsqu'on utilise le diamant polycristallin comme outil de découpe. Lorsque les fibres sont orientées à 0°, une bonne qualité de finition de surface est observée. En revanche, ce n'est pas le cas lorsque l'orientation est de -45° (Delahaigue,

2015). De plus, ils ont constaté que l'utilisation du diamant polycristallin entraîne une réduction significative de l'effort de découpe, pouvant aller jusqu'à 3 à 5 fois par rapport à l'utilisation du dépôt chimique en phase vapeur (CVD).

En résumé, les recherches de Delahaigue démontrent la faisabilité d'une découpe optimale du matériau composite lin/époxy, en privilégiant l'utilisation du diamant polycristallin comme outil de découpe. Cette méthode permet d'obtenir non seulement des finitions de surface de haute qualité, mais également de réduire considérablement l'effort requis pour la découpe par rapport à l'utilisation du CVD.

Au cours d'une étude récente réalisée par Delahaigue et al. En 2017 [87], l'usinabilité et l'intégrité de la surface lors de la découpe de composites à base de fibres de lin ont été examinées en détail. Les chercheurs ont examiné l'influence des paramètres de découpe, de l'orientation des fibres et des outils de coupe (CVD et PCD) sur les forces de découpe et la qualité de la surface résultante lors du fraisage de ces composites. Quatre orientations de fibres différentes (0, 90, +45 et -45 degrés) ont été prises en compte, ainsi que cinq vitesses de découpe et six vitesses d'avance.

Les résultats de l'étude ont mis en évidence des constatations importantes : premièrement, l'approche de fraisage en aval a été identifiée comme peu recommandée, car elle entraîne une détérioration significative de la qualité de la surface, caractérisée par la présence de nombreuses fibres non coupées dans les plis supérieurs et inférieurs des matériaux. Deuxièmement, les fibres orientées à 0 degré par rapport à la direction de découpe ont produit la meilleure qualité de surface, tandis que celles orientées à 45 degrés ont abouti aux résultats les moins favorables en termes d'état de surface.

En outre, les observations visuelles des surfaces usinées et les mesures de rugosité ont montré que lors de l'usinage avec l'outil CVD, une réduction minimale de la rugosité a été observée avec l'augmentation de l'avance, surtout pour les orientations des fibres à 0, 90 et 45 degrés. Pour les fibres orientées à 45 degrés, ils ont constaté qu'aucune tendance claire n'a été notée. À l'inverse, pour les échantillons usinés avec l'outil PCD et présentant des orientations de fibres à 0, 90 et 45 degrés, la rugosité a diminué progressivement avec l'augmentation de l'avance, se stabilisant à des vitesses d'avance plus élevées.

En somme, les résultats Delahaigue et al. Soulignent que l'orientation des fibres et l'avance jouent un rôle crucial dans la qualité de l'état de surface des composites à base de fibres de lin, tandis que la vitesse de coupe semble avoir un impact relativement mineur sur la rugosité de la surface. Ces

conclusions mettent en évidence l'importance de ces paramètres dans le processus de découpe des composites, offrant ainsi des indications précieuses pour l'amélioration des techniques d'usinage de ces matériaux complexes.

Mercy et al. (2022) [88] ont mené des expériences de perçage en utilisant un composite constitué d'une résine époxy renforcée par des fibres d'ananas unidirectionnelles, avec différentes conditions de coupe à l'aide d'un réseau orthogonal Taguchi L27. Leur recherche s'est concentrée sur l'évaluation de la force appliquée au composite pendant le perçage et sa relation avec les variables d'usinage. Ils ont utilisé une modélisation statistique pour établir le lien mathématique précis entre les facteurs d'usinage en entrée et les réponses obtenues. De plus, un algorithme génétique a été utilisé pour optimiser la force de poussée. Leurs résultats ont indiqué que la combinaison d'une vitesse de broche plus élevée, d'une vitesse d'avance plus faible et d'un petit diamètre de foret entraînait une moindre force de poussée.

L'étude menée par Chegdani et al. (2015) [89] visait à analyser l'influence des outils de coupe sur la qualité de la finition de surface lors du fraisage à sec de profilés en polypropylène renforcé de fibres de lin unidirectionnelles. Leurs résultats ont montré que l'usinage en opposition favorise le mécanisme de cisaillement des fibres de lin. De plus, des défauts de peluchage ont été observés sur les bords extrêmes de la surface usinée en raison de la réduction de la fixation des fibres naturelles dans cette zone.

Dans une étude plus récente, John et al. (2021) [90] ont analysé l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et le délaminage lors du fraisage en bout de composites de polypropylène renforcés de fibres de kénaf, de jute et de balle de riz. Leurs résultats ont montré que les fibres de kénaf présentaient les dommages de délaminage les moins importants et offraient la meilleure qualité de surface. Ils ont également noté que la teneur en silicium et la dureté entre ces trois matériaux avaient un impact significatif sur la qualité de surface. Par ailleurs, Nassar et al. (2017) [91] ont observé que lors de l'usinage de composites de polyester renforcés de fibres de chanvre, de banane, de jute et de verre, l'utilisation d'une faible vitesse d'avance et d'une vitesse de coupe élevée était recommandée.

L'augmentation du nombre de cannelures lors de l'usinage des polymères renforcés de fibres naturelles (NFRP) entraîne une réduction significative de délaminage et de la rugosité, comme expliqué par Celik et al. (2019) [92]. Cependant, selon Chegdani [93], il a été constaté que le type de matrice polymère, qu'elle soit thermodurcissable ou thermoplastique, n'affectait pas de manière

significative le comportement de coupe des fibres naturelles. De plus, il a été souligné que la force de coupe ne constitue pas un indicateur fiable de l'usinabilité des NFRP.

Slamani et al. (2021) [94] ont entrepris d'évaluer la rugosité de surface du composite de fibre de lin en utilisant deux outils de coupe différents dans diverses conditions. La méthodologie a impliqué l'utilisation d'un plan randomisé de parcelles divisées pour modéliser la rugosité de surface. Les résultats ont révélé que le processus de fabrication du composite renforcé de fibre de lin était remarquablement simple, sans aucune usure notable des outils. L'usinage en avalant a produit une qualité de surface inhomogène, ce qui indique qu'il devrait être évité lors de la coupe des composites à fibres de lin. De plus, l'avance a été identifiée comme le facteur le plus crucial influençant la rugosité de la surface pour toutes les combinaisons testées. Parmi les trois modèles évalués (krigeage, Bezier et B-spline), le modèle B-spline s'est avéré le plus adapté pour prédire la rugosité de surface. Il a démontré une excellente corrélation avec les données estimées, offrant des prédictions plus précises et entraînant ainsi une réduction de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et de l'écart type relatif (RSD), ainsi qu'une valeur R^2 plus élevée.

Tabet et al. (2021) [95] ont étudié les effets des paramètres de perçage tels que la vitesse de broche (N), la vitesse d'avance (f), le diamètre de l'outil (d) ainsi que les types de forets tels que les forets hélicoïdaux (ARS-TIN) et à pointe à éperon (BSD) sur le délaminage dans une structure sandwich bio-source composée d'une matrice époxy renforcée de fibres de jute bidirectionnelles et de liège (JFCE). Ils ont employé la méthodologie de surface de réponse (RSM) et l'apprentissage automatique (ANN) pour évaluer l'impact des paramètres de coupe sur le facteur de délaminage (Fd) et ont analysé leurs interactions pendant le processus de forage. Les résultats ont révélé des dommages considérables avec l'outil BCD ($Fd=1.684$) par rapport à l'outil ARS-TIN ($Fd=1.555$) dans les mêmes conditions de coupe. Les paramètres optimaux obtenus grâce à l'optimisation génétique étaient les suivants : 1397.54 tr/min pour la vitesse de broche, 51.162 mm/min pour la vitesse d'avance et 5.981 mm pour le diamètre de l'outil, concernant les valeurs de f , N et d . Ces résultats étaient similaires à ceux trouvés par Belaadi et al. (2020) [96], où la vitesse d'avance avait une influence sur la qualité d'usinage et le diamètre de l'outil avec des valeurs très proches de celles obtenues par Tabet et son équipe.

Benyettou et al. (2023) [97] ont réalisé une étude sur l'efficacité du perçage de biocomposites renforcés de palmier dattier en utilisant trois types de forets distincts : ARS-Titan, ARS-Carbid et ARS Super, et en effectuant des perçages à différentes vitesses de broche et d'avance. Les

performances de perçage ont été évaluées en se basant sur le facteur de délaminage, déterminé à l'aide du logiciel Image J. Leurs résultats ont montré que le facteur de délaminage diminuait avec des vitesses de broche plus élevées, mais augmentait avec des vitesses d'avance plus élevées. Notamment, le foret ARS-Super a induit moins de délaminage que les deux autres types de forêts. Pour anticiper le délaminage, une méthode basée sur les réseaux de neurones artificiels (ANN) a été utilisée. La meilleure qualité de trou a été obtenue avec les forêts ARS-Super à une vitesse de broche de 2200 tr/min et une vitesse d'avance de 40 mm/tr. En revanche, le résultat le moins favorable a été obtenu avec le foret ARS-Carbid à une vitesse de broche de 500 tr/min et une avance de 120 mm/tr.

1.7 CONCLUSION

Cette revue bibliographique nous a permis d'acquérir une vue d'ensemble des principales techniques étudiées pour évaluer le processus de découpe des composites à base de fibres naturelles. Ce sujet revêt une importance particulière en raison des défis environnementaux auxquels nous faisons face aujourd'hui. Les matériaux composites à base de fibres naturelles suscitent un intérêt croissant en raison de leur caractère naturel, biodégradable, de leur recyclabilité facile et de leur abondance. De plus, l'extraction des fibres naturelles ne nécessite pas d'énergie supplémentaire, ce qui les rend économiquement avantageuses. Leurs propriétés spécifiques, similaires à celles des fibres synthétiques plus légères, et leur résistance à l'abrasion offrent des opportunités d'économies substantielles.

Cependant, les composites à fibres naturelles sont relativement faciles à usiner, mais en raison de la viscoélasticité des fibres, la qualité de la surface obtenue est souvent médiocre. Plusieurs défauts peuvent survenir, tels que le délaminage, les fibres non coupées, l'arrachement des fibres ou des problèmes de matrice. Pour améliorer la qualité de la coupe et optimiser la productivité, la littérature suggère l'utilisation de vitesses d'avance faibles à moyennes et d'une vitesse de coupe élevée lors du détournage. D'autres facteurs, tels que l'orientation des fibres et le choix de l'outil de coupe, jouent également un rôle crucial dans la qualité et la productivité de l'usinage des composites à fibres naturelles. L'objectif principal de cette thèse est de contribuer à l'avancement de l'usinage des composites à fibres naturelles en élaborant des modèles de prédiction universels. Ces modèles sont destinés à évaluer la rugosité de surface et à approfondir notre compréhension de l'impact du délaminage sur la qualité de la surface. Ils sont conçus pour être applicables de manière générale dans ce domaine spécifique.

CHAPITRE 2

Méthodologie expérimentale

21 INTRODUCTION

Comme décrit précédemment, la production de composites à base de fibres naturelles, en particulier les composites renforcés de fibres Alfa, présente une complexité en raison de sa nature hétérogène. De plus, les propriétés viscoélastiques des fibres naturelles ajoutent une couche de complexité supplémentaire au processus d'usinage de ce matériau. En effet, plusieurs imperfections de fabrication émergent à la suite d'une étape de découpe conventionnelle, engendrant des problèmes tels que le délaminage inadéquat, la rupture des fibres, la dégradation de la matrice et la formation de microfissures.

Cette étude se focalise sur l'analyse de l'influence des paramètres de coupe qui ont été identifiés dans la littérature comme étant les plus cruciaux lors de l'usinage des composites. Les principaux facteurs identifiés comprennent : la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et l'orientation des fibres (à 0° et 90°).

22 PRESENTATION ET ELABORATION DU MATERIAU COMPOSITE

2.2.1 Fibres d'Alfa utilisées

La fibre naturelle utilisée dans cette étude pour renforcer les composites sont des fibres de la plante d'Alfa, qui ont été étudié pour la première fois dans le domaine de détournement des composites renforcée par des fibres naturelles.

L'alfa (*Stipa tenacissima* L.) est une plante herbacée qui se distingue par ses rhizomes très ramifiés, perpétuelle, qui forme des touffes compactes évoluant en structures annulaires. Elle est principalement présente dans la région occidentale du bassin méditerranéen [98]. Sa principale application industrielle réside dans la fabrication de pâte à papier à partir de ses feuilles.

Les fibres d'alfa présentent une forme circulaire avec une cavité centrale, possédant une décomposition naturelle et dérivant de ressources renouvelables. Leur composition est variée, étant principalement constituée de cellulose (entre 40 % et 50 %), de lignine (de 17,71 % à 24 %), d'hémicellulose (de 22,15 % à 28 %), avec une proportion de cire d'environ 5 % [99-101]. En conséquence, les propriétés des fibres d'alfa sont hautement anisotropes, reflétant ainsi la caractéristique dominante des fibres naturelles.

L'Alfa trouve fréquemment usage pur. Cependant, l'extraction des fibres d'Alfa est un concept récemment abordé, restreint principalement à des méthodes traditionnelles.

L'extraction à partir d'eau de mer et une méthode chimique utilisant une faible concentration de soude afin de préserver la cellulose. Cependant, ces méthodes demandent une gestion simultanée de plusieurs paramètres, ce qui rend la tâche complexe. De plus, les chercheurs s'efforcent d'ajuster ces paramètres de manière optimale en fonction de l'usage final prévu pour ces fibres extraites, ce qui a engendré une diversité considérable de méthodes d'extraction de fibres cellulosiques.

2.2.2 La collecte de la plante d'Alfa

Dans la vaste étendue des fibres végétale, nous avons opté pour la fibre d'Alfa. La plante utilisée est issue des steppes Algérienne, dans la région Boussâda relevant de la wilaya de Msila. Elle a été récoltée en printemps au mois d'Avril (figure 2.1).



Figure 2.1. L'Alfa dans son biotope.

2.2.3 L'extraction des fibres d'Alfa

La première étape implique l'élimination de toutes les impuretés et les éléments étrangers, assurant ainsi que seules les tiges propres et utilisables restent. Ensuite, on procède à la découpe des extrémités des tiges, car celles-ci présentent la plus grande variation de diamètre. L'une des extrémités est pointue et aiguë, tandis que l'autre est courbée et rigide. Il est essentiel de les supprimer, car ces crochets, une fois extraits, peuvent former des nœuds et entraîner l'enchevêtrement des fibres fines, Cela forme une structure semblable à des "neps", un amas de fibres inextricablement enchevêtrées. Dans certaines situations où il y a une grande disparité de diamètre entre l'extrémité supérieure et l'extrémité inférieure, il est plus judicieux de procéder à la découpe et à la manipulation exclusivement sur la partie centrale des tiges afin d'assurer une uniformité sur l'ensemble de leur longueur.

2.2.4 Le rouissage à l'eau

Le rouissage dépend de la croissance de micro-organismes. Les tiges d'Alfa sont plongées dans l'eau pendant 25 jours et soumises à des bactéries anaérobies. Une fois que les fibres se sont détachées sur toute leur longueur, les plantes sont retirées de l'eau et séchées. Cependant, L'un des inconvénients majeurs de ce processus est la contamination de l'eau, car le rouissage à l'eau est réalisé dans des cuves d'eau à température modérée (37°C) jusqu'à ce que les fibres soient dépourvues de lignine et non collantes.

2.2.5 L'extraction mécanique

Pour obtenir les fibres d'Alfa, les tiges sont soumises à une action mécanique de broyage est réalisée à l'aide d'un peigne pourvu de dents métalliques. Ce peigne est déplacé de manière longitudinale le long des tiges, ce qui réduit leur diamètre pour qu'elles passent entre les dents, tout en éliminant une certaine quantité de bois. Cette opération aboutit à l'obtention de fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima L.*). Ce processus permet d'ouvrir les tiges, améliorant ainsi l'accessibilité des fibres aux traitements chimiques (figure2.2).



Figure 2.2. L'extraction mécanique des fibres.

2.2.6 Le séchage

Les fibres sont immergées dans un bain-marie puis laissées à l'air libre pendant 18 heures. Après ce processus de séchage initial, les fibres sont transférées dans une étuve chauffée à une température de 70 degrés Celsius. Elles y restent pendant 6 heures jusqu'à l'obtention des fibres alfa non traitées, comme illustré par la figure 2.3.



Figure 2.3. Le séchage des fibres.

2.2.7 Traitement alcalin L'hydroxyde de sodium (fibres traitées)

L'hydroxyde de sodium est un composé chimique alcalin dont la formule est NaOH. Également désigné sous le terme de soude caustique, il trouve son utilisation dans divers secteurs industriels. Sa solubilité dans l'eau est remarquablement élevée, les caractéristiques de NaOH sont présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Caractéristiques de NaOH.

Masse molaire	39.997 g.mol ⁻¹
La formule chimique	NaOH
Densité	2.13 g.cm ⁻³
Point de fusion	318°C

Le traitement des fibres d'Alfa implique leur immersion dans un bain d'hydroxyde de sodium (NaOH) pendant 18 heures. Ce processus vise à éliminer la cire et les impuretés présentes sur les fibres. Les différentes étapes du traitement par NaOH sont illustrées dans la figure 2.4.



Figure 2.4. Les fibres traitées par NaOH à 5%

La soude caustique est éliminée et neutralisée en la traitant avec une solution aqueuse contenant 2 % d'acide sulfurique pendant 2 minutes à la température ambiante. Par la suite, la fibre est méticuleusement rincée à plusieurs reprises à l'eau distillée. Enfin, le séchage des fibres est réalisé à l'air libre pendant 24 heures, puis elles sont placées dans un four à une température de 60 degrés Celsius. Les caractéristiques résultantes sont présentées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2. Caractéristiques des fibres d'Alfa

Densité surfacique	600 (g/cm^2)
Densité volumique	0.89-2.10 (g/cm^3)
Nature	Fiber sèche
Orientation	Unidirectionnel (UD° 0°)
Traité, non traité	NAOH /18h

23 CLASSIFICATION DES TYPES DE TISSUS

Le tissage demeure la méthode la plus ancienne et la plus répandue pour la fabrication des textiles [102]. Dans ce processus, deux ensembles de fils sont entrelacés de manière perpendiculaire (voir Figure 2.5), créant ainsi les tissus. Les fils qui s'étendent dans le sens longitudinal à travers le tissu sont appelés fils de chaîne (alignés parallèlement à l'axe principal du tissu), tandis que les fils disposés perpendiculairement à la chaîne sont désignés comme les fils de trame ou de remplissage (orientés perpendiculairement à la direction de déformation). Plusieurs structures de renfort sont utilisées, y compris les structures unidirectionnelles (sous forme de nappes ou de groupes de fils), les structures bidirectionnelles (comme les tissus ou les agencements 2D) et les structures tridimensionnelles (avec des fibres orientées selon trois directions).

Dans une nappe unidirectionnelle (UD) caractérisée par un déséquilibre significatif, leur mode d'entrelacement ou de tissage les différencie.

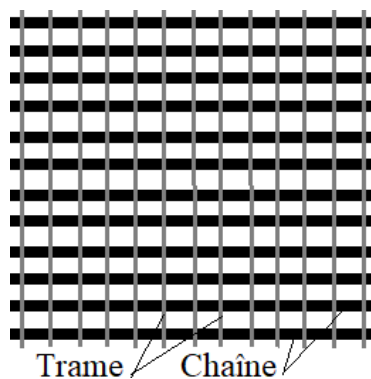


Figure 2.5. Renforts unidirectionnels (UD)

Un dispositif en bois spécialement conçu pour le tissage manuel a été créé. Ce processus débute par la préparation des fibres traitées et non traitées, suivi du tissage d'un empilement de plis unidirectionnels, comme illustré dans la figure 2.6.



Figure 2.6. Tissage d'alfa.

24 RÉSINE ÉPOXY

La société Granitex, établie à Oued Smar en Algérie, propose une résine appelée Medapoxy STR, spécialement conçue pour le renforcement par des fibres naturelles [103]. Cette résine composite est fabriquée en combinant de la résine époxy et un durcisseur dans un rapport de 2 pour 1. La polymérisation des échantillons peut se dérouler à température ambiante sur une période de 10 jours. La résine Medapoxy STR est caractérisée par une viscosité de 11000 MPa.s à 25°C et une densité de $1,1 \pm 0,05$, garantissant ainsi une résistance mécanique optimale et une stabilité accrue.

25 FABRICATION DES PLAQUES COMPOSITES

Le matériau composite utilisé dans cette étude est élaboré en utilisant la technique de moulage sous vide, comme illustré dans la figure 2.7.



Figure 2.7. Moulage sous vide pour la production de plaques composites.

Le processus de fabrication des échantillons se déroule comme suit :

Premièrement, un empilement de quatre couches sèches est disposé sur un moule dans une orientation unidirectionnelle (0°). Ensuite, l'injection est effectuée. Le moule est rendu étanche par un joint positionné autour de la cavité. La résine, préalablement testée pour son étanchéité, est préparée en association avec le durcisseur pour initier la formation des plaques de moulage.

Enfin, une phase de cuisson finale est réalisée dans une étuve à 80°C pendant 6 heures. En résultat, deux plaques composées de quatre couches traitées et non traitées, mesurant $250\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ et affichant une proportion volumique de fibres de 45 %, sont obtenues (Figure 2.8).



Figure 2.8. Plaques Epoxy/Alfa produites.

2.6 DISPOSITIF D'USINAGE

2.6.1 Fixation de la plaque

Pour résister à l'effort de coupe et éliminer ainsi toute source de vibration, la plaque composite doit être fermement maintenue sur le montage d'usinage. En conséquence, plusieurs trous ont été percés dans la plaque composite (Fig.2.9).

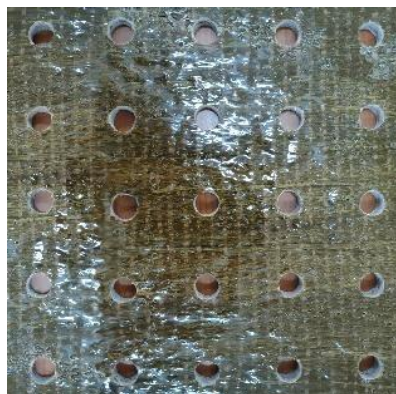


Figure 2.9. Plaques Epoxy/Alfa produites.

2.6.2 Machine et Dispositif d'usinage

Pour accomplir cette tâche, un dispositif d'usinage (gabarit) a été développé pour fixer correctement les éprouvettes pendant les tests de détourage (Fig.2.10). Il s'agit d'une machine-outil à commande numérique (MOCN) à trois axes munie d'un contrôleur SIEMENS 840D.



Figure 2.10. Centre d'usinage PEARL RIVER NC F-VMC 510L.

Le sous-ensemble plateau et dispositif d'usinage est solidement fixé sur la table de la machine (Fig.2.11). Le gabarit est pré-rainuré pour permettre l'évacuation de l'outil et ainsi éviter les collisions entre l'extrémité de l'outil et le gabarit lors du détourage. De plus, les rainures du gabarit sont légèrement plus grandes (10,5 mm) que le diamètre de l'outil (10 mm) pour permettre le passage de l'outil de fraisage sans frottement (Fig.2.11).



Figure 2.11. Plaque composite fixée sur le montage d'usinage.

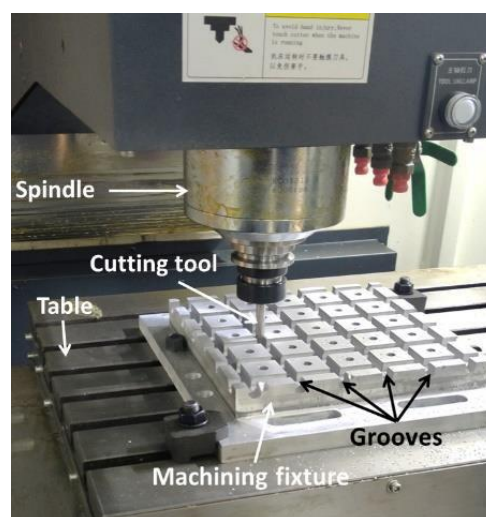


Figure 2.12. Dispositif d'usinage.

2.6.3 Outil de coupe

Le choix adéquat de l'outil et les paramètres de coupe, ont une importance capitale dans le processus d'usinage [104-106]. Wang et al ont analysé l'influence de la forme géométrique de l'outil de coupe sur ces paramètres de coupe [20, 21].

Dans ce travail, La sélection de l'outil de coupe s'est principalement fondée sur les données expérimentales issues d'études antérieures concernant la découpe de biocomposites lin/époxy. Delahaigie [47] a utilisé une fraise abrasive ARS à 4 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. Inoue et Hagino [107] ont employé six outils, dont deux en acier rapide ARS, pour étudier les influences 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 expériences ont montré que la force de coupe et la température de coupe augmentent lors de la coupe de matériaux orientés de manière aléatoire, quel que soit le type d'outil de coupe utilisé. Ils ont conclu qu'une fraise ARS utilisée à un faible avancement combiné à une vitesse de broche élevée engendre un délaminage minimal et prolonge la durée de vie de l'outil de coupe. En conséquence, un outil de coupe ARS de 10 mm de diamètre a été choisi dans ce travail pour la découpe du matériau composite Alfa (Fig. 2.13).



Figure 2.13. Outil de coupe acier rapide (ARS).

Le tableau 2.3 présente les spécifications de cet outil.

Tableau 2.3. Caractéristiques de l'outil.

Matériel	Acier rapide (ARS)
Diamètre	10mm
Nombre de dents	4
Angle d'hélice	30°
Longueur totale	70mm
Longueur utile	28mm

2.7 PLAN D'EXPÉRIENCE

Afin de mener à bien cette expérience sur l'usinage du composite de fibres Alfa, un plan expérimental factoriel complet avec deux facteurs, chacun ayant cinq niveaux, est utilisé. Au total, 25 tests ont été réalisés (tableau 2.4). Les facteurs sont la vitesse de coupe (V_c) exprimée en (m/min) et la vitesse d'avance (f) en (mm/tr).

Tableau 2.4. Plan expérimental factoriel complet.

N°	V_c	f	N°	V_c	f	N°	V_c	f	N°	V_c	f	N°	V_c	f
	m/min	mm/rev		m/min	mm/rev		m/min	mm/rev		m/min	mm/rev		m/min	mm/rev
1	50	0.05	6	100	0.05	11	150	0.05	16	200	0.05	21	225	0.05
2	50	0.15	7	100	0.15	12	150	0.15	17	200	0.15	22	225	0.15
3	50	0.25	8	100	0.25	13	150	0.25	18	200	0.25	23	225	0.25
4	50	0.40	9	100	0.40	14	150	0.40	19	200	0.40	24	225	0.40
5	50	0.50	10	100	0.50	15	150	0.50	20	200	0.50	25	225	0.50

Les réponses du plan d'expérience sont choisies en fonction de leur désirabilité ou de leur pertinence pour l'interprétation des observations. Les réponses mesurées dans le plan sont :

- La rugosité de surface (μm) (Critères : Ra);
- La présence de délaminage des fibres externes (oui/non) (évaluation visuelle).

La plaque composite est usinée selon deux directions parallèles et perpendiculaires à la direction des fibres (Figure 2.14).

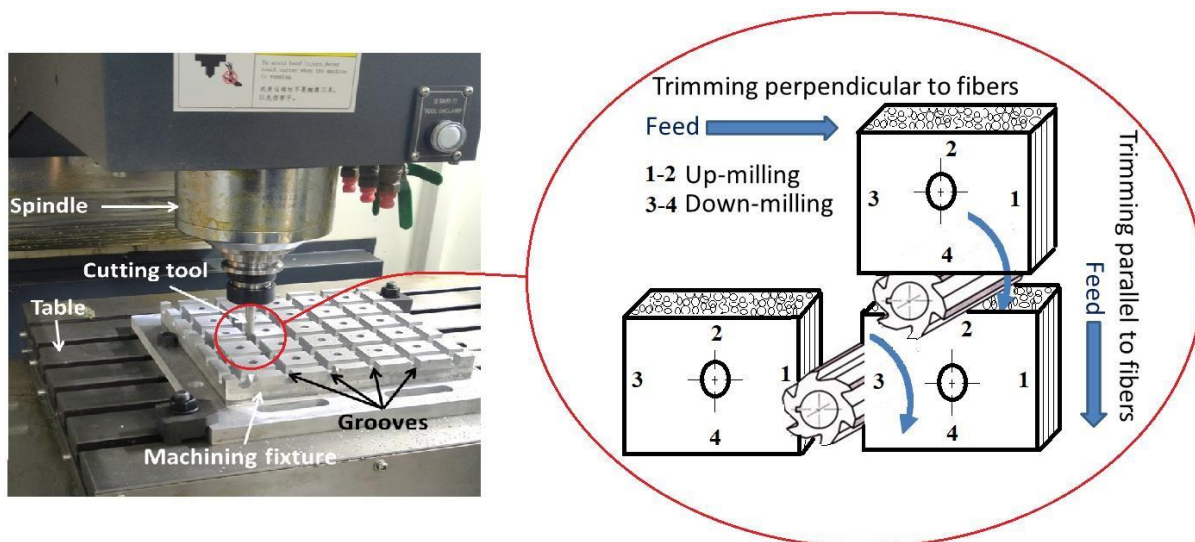


Figure 2.14. Modes de coupe sur chaque face.

Comme illustré dans la figure 2.14, chaque échantillon démontre jusqu'à 4 configurations expérimentales uniques (une configuration par côté), incluant deux configurations de fraisage en opposition (faces 1-2) et deux configurations de fraisage en avalant (faces 3-4).

2.7.1 La rugosité de surface (Ra)

Après usinage, tous les échantillons sont soigneusement nettoyés pour éliminer toutes les impuretés et poussières à l'aide d'air comprimé soufflé. Ensuite, la rugosité de surface (moyenne de rugosité (Ra)) de chaque côté de chaque coupon (chaque condition de coupe) a été mesurée à l'aide d'un testeur Mitutoyo SurfTest-4 (Fig.2.15) équipé d'une sonde ayant un diamètre de $2\ \mu\text{m}$ et une orientation de 60° par rapport aux surfaces. Toutes les mesures ont été répétées trois fois.



Figure 2.15. Testeur de rugosité Mitutoyo SurfTest-4.

La mesure de Ra est effectuée sur une surface spécifique dans la direction parallèle à la direction des fibres 0 degrés (0°), soient les surfaces N°1 et N°3, puis on mesure également la surface spécifique dans la direction perpendiculaire à la direction des fibres 90 degrés (90°), c'est-à-dire les surfaces N°2 et N°4 illustrée par la figure 2.16.

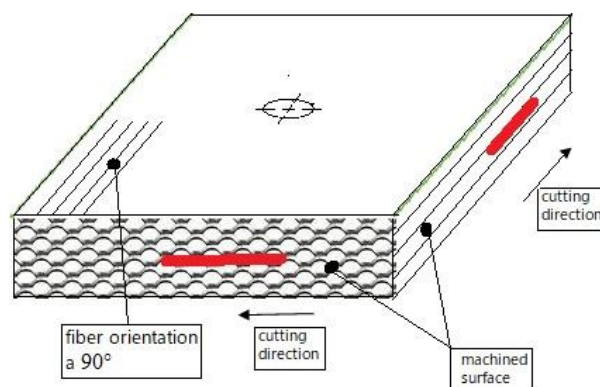


Figure 2.16. Présentation d'éprouvette et situation des mesures d'état de surface.

Les échantillons sont positionnés sur une table pour garantir leur déplacement précis tout en étant maintenus en place par un dispositif de serrage. Il est crucial de réguler la force de serrage afin d'éviter d'endommager les échantillons et de prévenir toute séparation des fibres externes. Pour chaque configuration de coupe, trois mesures aléatoires ont été prises, totalisant ainsi 300 mesures par échantillon et par direction de coupe (comprenant 150 mesures transversales et 150 mesures longitudinales pour chaque matériau). Le nombre total de mesures pour chaque section utilisée a été établi en considérant la variabilité des résultats. Les moyennes des valeurs de rugosité (Ra) issues des diverses configurations de coupe ont été calculées.

2.7.2 Mesure du délaminage

L'évaluation de l'intégrité des surfaces des composites repose sur la détection du délaminage, un facteur crucial. Diverses méthodes sont mentionnées dans la littérature pour quantifier ce phénomène, incluant le scanner [108], la radiographie aux rayons X [109], la microscopie laser [110] et la microscopie électronique à balayage (MEB) [111].

Le délaminage est généralement caractérisé par sa profondeur moyenne [23], la longueur des fibres intactes [112] et le paramètre de délaminage F_d [110, 113]. Son évaluation se fait en comparant les mesures nominales aux dimensions maximales des défauts de délaminage observés après l'usinage, notamment lors des opérations de perçage et de rainurage. Cette méthode permet de mesurer la détérioration de la surface. Pour le détournage, à la fois les dimensions et le nombre de défauts sont mesurés pour évaluer la qualité de la surface.

Janardhan et al. (2006) [114] ont classifié les types de délaminage lors de l'analyse d'un composite à base de fibres de carbone longues et de résine époxy. Le premier type de défaut, appelé défaut de type I, survient lorsque le matériau se déchire, créant un cratère. Le deuxième type de défaut, appelé défaut de type II, se caractérise par des fibres non coupées. Le défaut de type I/II combine ces deux défauts précédents. Enfin, le défaut de type III correspond à un délaminage entre les couches du matériau, marqué par des fissures se développant dans la direction des fibres (Figure 2.17).

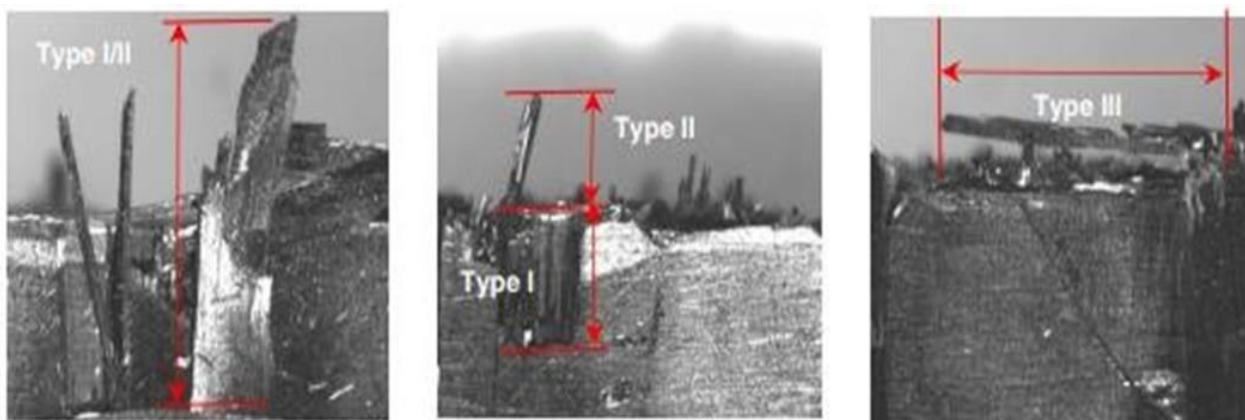


Figure 2.17. Différents modes de délaminage et leur mesure [114].

Une fois le processus de détournage achevé, une évaluation détaillée a été entreprise pour analyser la qualité et les caractéristiques des spécimens usinés. Une attention particulière a été portée au délaminage, un élément critique dans les matériaux composites, qui a été minutieusement examiné à l'aide d'un microscope optique de haute puissance de type Keyence VHX-500FE (Fig. 2.18). Ce microscope offre une résolution de 1 μm et un grossissement de 40X, garantissant ainsi une évaluation précise de l'intégrité des spécimens détournés. Il a également été utilisé pour faciliter les mesures de rugosité, assurant un suivi précis de la couche à mesurer en repérant toute divergence dans le tracé du pointeur. Cette méthode a non seulement amélioré la précision des mesures des plis de composites, mais a également permis de détecter toute impureté adhérent à la surface analysée, réduisant ainsi les erreurs de mesure.



Figure 2.18. Microscope universel.

Pour analyser l'intégrité de la surface de manière approfondie, un microscope électronique à balayage (MEB) de type EVO15 a été employé. Ce MEB est capable d'agrandir les échantillons jusqu'à un grossissement de 250X (Fig. 2.19). Le MEB est un équipement essentiel en sciences, incluant la biologie, la physique et la chimie, permettant l'observation des échantillons à un niveau microscopique avec une résolution extrêmement élevée. La métallisation des surfaces a été appliquée pour prévenir la détérioration des surfaces lors de l'observation au microscope électronique à balayage. Cependant, ce procédé de revêtement peut masquer certains défauts au niveau des microfibrilles de cellulose. En utilisant un faisceau d'électrons pour explorer la surface de l'échantillon à 15 kV, le MEB génère des images en 3D détaillées, fournissant des données précises sur la topographie de l'échantillon ainsi que des informations sur sa composition chimique. Cela permet l'observation des détails nanométriques.



Figure 2.19. Microscope électronique à balayage EVO15

CHAPITRE 3

Étude du comportement à l'usinage d'un matériau unidirectionnel Epoxy / Alfa

3.1 INTRODUCTION

Les composés de fibres naturelles sont considérés comme des matériaux importants pendant le siècle dernier, dans le champ de la science des matériaux. Considéré comme un matériau respectueux de l'environnement, il offre une véritable alternative aux fibres synthétiques plus courantes (les fibres de verre et de carbone). Ces dernières années, on a observé une forte expansion de ses applications dans plusieurs secteurs industriels, notamment dans l'automobile [115, 116] et la marine [117, 118].

La fabrication d'une pièce en matériau composite comprend deux étapes cruciales. La première étape consiste à créer le composite, au cours de laquelle la forme finale de la pièce est obtenue à partir d'une pièce brute, avec des dimensions plus ou moins précises. La deuxième étape, appelée réalisation, vise à définir les dimensions de la pièce, ainsi qu'à créer les géométries supplémentaires nécessaires à son utilisation (tels que des trous traversant, des entretoises, etc.).

Cependant, la mise en œuvre de ces matériaux est entravée par les défis liés à l'usinage, qui découlent de l'anisotropie et de la non-homogénéité de leur structure, ainsi que de l'abrasivité élevée des renforts. Les outils de coupe traditionnellement employés pour l'usinage des matériaux métalliques atteignent actuellement leurs limites. Lorsqu'on doit manipuler des composites. Par exemple, les outils en carbure permettent d'obtenir une qualité de coupe satisfaisante, mais leur durée de vie est considérablement réduite en raison de l'abrasivité des matériaux composites [119].

Le détournage est un procédé d'usinage visant à délimiter les bords exposés de structures métalliques ou composites en éliminant de la matière. Plusieurs paramètres influencent la qualité de l'usinage. Les facteurs liés à l'outil incluent le nombre de dents, le diamètre, l'angle d'hélice, le rayon des arêtes de coupe, l'angle de dépouille, et le matériau de l'outil. Les paramètres liés au matériau à usiner comprennent le type de fibres (carbone, verre, aramide, etc.), la nature de la résine, l'orientation des fibres, la séquence de superposition des couches, l'épaisseur à usiner, ainsi que les additifs présents dans la résine.

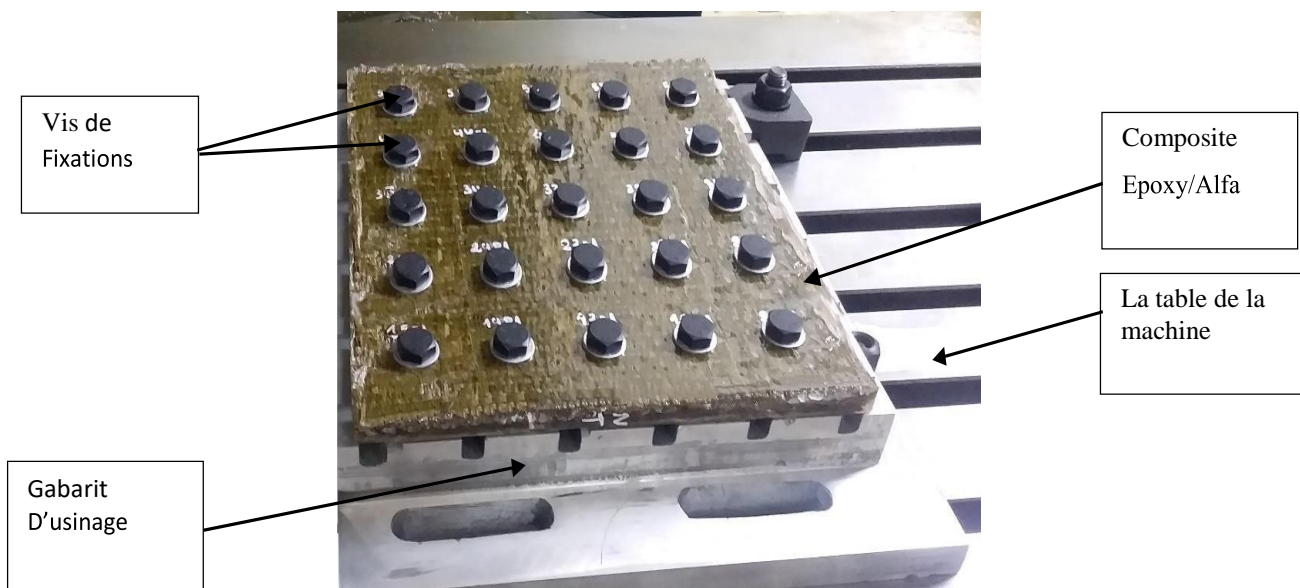
De plus, les paramètres de coupe exercent une forte influence sur les multiples mécanismes qui se déclenchent lors de l'interaction entre l'outil de découpe et le matériau à usiner, notamment la vitesse de coupe (V_c), la vitesse d'avance (f) et la distance d'usinage (L_c) traversé par l'outil de coupe avec des conditions d'usinage, reconnues dans les littératures comme cruciales pour la qualité des surfaces usinées [66].

La qualité du produit final se mesure principalement par deux critères : l'intégrité de la surface (comprenant la rugosité, le délaminage, etc.) et l'usinabilité de la pièce (incluant les efforts de coupe et l'usure de l'outil de coupe) [120]. Les défauts de surface prennent diverses formes, on citera, l'arrachement de fibres, les fibres non coupées, le délaminage (détachement entre les couches) et les dommages thermiques à la matrice, engendrant une dégradation et un étalement. Il est donc essentiel de quantifier, mesurer et surveiller ces défauts, notamment grâce à des méthodes d'analyse de la rugosité et la détection des délaminages. La rugosité est influencée par les paramètres de coupe et l'orientation des fibres, comme le montrent de nombreuses études.

Le but de cette étude est d'examiner un nouveau composite de fibres végétales tel que l'Alfa (Stipa Tenacissima L.) et d'analyser son usinabilité afin d'évaluer son aptitude à des applications industrielles. Afin de déterminer les conditions de coupe optimales (vitesse de coupe et avance) sur le fini de surface en tenant compte du rapport coût/qualité et de l'efficacité.

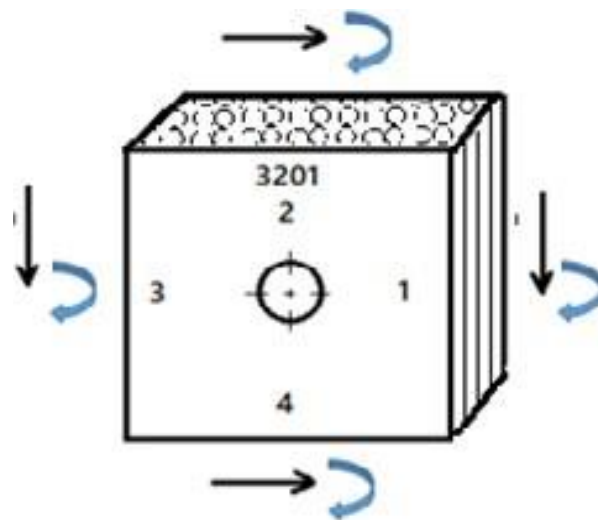
3.2 DÉTOURAGE DES PLAQUES EPOXY/ALFA

Le détournage a été effectué avec le centre d'usinage à une vitesse de broche atteinte à 8000 tr/min. Un dispositif d'usinage est attaché sur la table de la machine (Figure 3.1).



Dans cette étude, des expériences sont conçues à l'aide d'un plan factoriel à deux facteurs, la vitesse de coupe en (m/min) et l'avance en (mm/tr). Chacun de ces facteurs comporte cinq niveaux. Ainsi, le plan d'expérience complet consiste en 25 tests, comme indiqué dans le tableau 2.4 du chapitre précédent. Les plaques du composite sont coupées dans deux directions, opération 1 (op1) et opération 2 (op2).

Le processus initial comporte cinq étapes, où la vitesse de coupe (V_c) est maintenue constante, tandis que la vitesse d'avance (f) est modifiée. Ensuite, le processus suivant comprend également cinq étapes, où la vitesse d'avance est maintenue constante, mais la vitesse de coupe est variée à chaque étape pour obtenir 25 coupons. Chaque coupon a des dimensions de 35 mm x 35 mm et représente jusqu'à quatre combinaisons expérimentales distinctes, soit deux combinaisons pour l'usinage avalant et deux combinaisons pour l'usinage en opposition. Ainsi, une plaque avec une configuration de 0° génère un total de 25 coupons, ce qui équivaut à 50 conditions de coupe au total.



3201 : numéro d'échantillon, 3: ligne n° 3, 2: colonne n° 2, 01: plaque n° 1 (non traité), 1-2-3-4 : numéro des faces, 1-2 : usinage en opposition, 3-4 : usinage en avalant.

Figure 3.2. Les faces du coupon du composite Epoxy/ Alfa.

Afin d'étudier l'effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface lors de l'opération de découpage du composite renforcé de fibres Alfa, une série de rainures a été réalisée en deux orientations distinctes. La première série a été usinée parallèlement aux fibres (Figure 3.3).

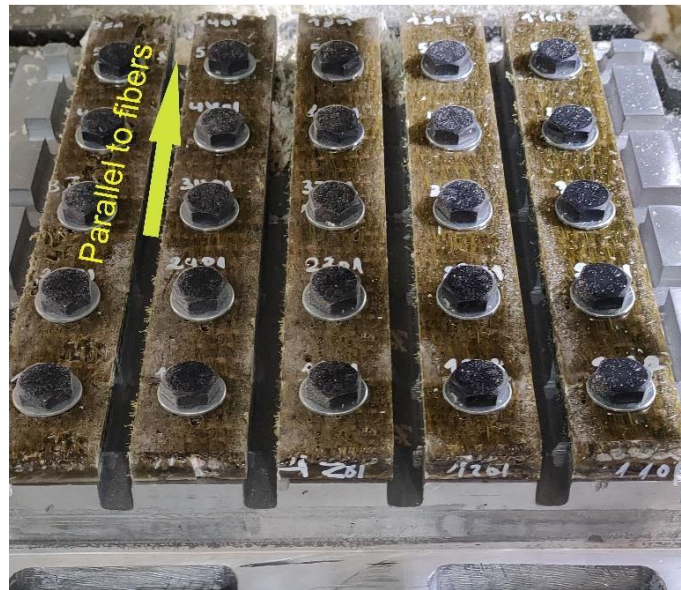


Figure 3.3. Rainure parallèle à l'orientation des fibres.

La seconde série a été réalisée perpendiculairement aux fibres (Figure 3.4). Au total, cela a engendré à notre disposition de 25 coupons carrés usinés, comme illustré dans la Figure 3.4. Chaque coupon présente quatre faces usinées, dont deux ont été traitées par fraisage en opposition et les deux autres par fraisage en avalant.



Figure 3.4. Rainure perpendiculaire à l'orientation des fibres.

Il convient de noter qu'il a été relevé dans des études précédentes [81, 121] que lors de l'usinage des matériaux composites renforcés de fibres de carbone (CFRP) avec un outil usé, de la fumée pouvait se former. Cela est souvent associé à une usure importante de l'outil et à des forces de

Coupe élevées, ce qui peut provoquer la surchauffe de la matrice et potentiellement entraîner des dommages [76].

Bien que l'usinage des composites à fibres d'Alfa, préserve généralement la qualité de l'outil de coupe et n'induit pas d'usure notable en raison de la nature non abrasive de ces fibres naturelles, il a été observé, au cours de nos expériences actuelles, que de la fumée se formait lors du rainurage des composites à fibres Alfa (comme le montre la Figure 3.5) sous des conditions de faible vitesse d'avance et de vitesse de coupe élevée. Cette observation peut s'expliquer par le maintien de la chaleur générée pendant la découpe dans la zone de coupe, en raison de la faible conductivité thermique de la matrice en résine époxy. En conséquence, le frottement et la faible avance augmentent la température dans la zone de découpe. Cette augmentation de la température, associée à la plus grande inflammabilité des fibres naturelles par rapport aux fibres synthétiques [122], peut entraîner la combustion des fibres Alfa (voir figure 3.5), la carbonisation de la matrice et la production de fumée. En fin de compte, cela peut également entraîner l'assouplissement et la dégradation de la matrice [123].



Figure 3.5. Fumée émise lors du rainurage du composite de fibres Alfa.

3.3 Analyse des résultats de rugosité

Les surfaces usinées obtenues par découpe perpendiculaire (90°) et parallèle (0°) aux fibres ont été examinées dans cette section. Afin d'évaluer la rugosité de surface du composite époxy/Alfa, des mesures de la rugosité (Ra) ont été prises avec du testeur de rugosité Sufitest-4 mentionné dans la section précédente.

De manière générale, la rugosité est un indicateur de la qualité élevée des surfaces, influençant non seulement l'aspect visuel d'une pièce, mais également diverses autres caractéristiques ; le niveau d'usure anticipé et la qualité de l'assemblage. Elle a également un impact significatif sur la modification de plusieurs propriétés de la pièce finie. Par conséquent, l'évaluation de la rugosité de la surface est essentielle.

La figure 3.6 montre un histogramme de la rugosité de surface en fonction du mode d'usinage (fraisage en opposition et fraisage en avalant) quelles que soient les paramètres utilisés (V_c) et (f).

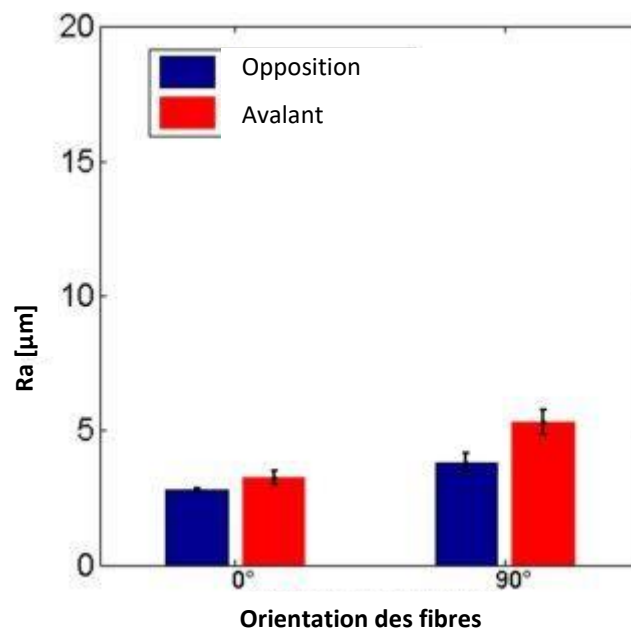


Figure 3.6. Rugosité de surface R_a en fonction de l'orientation des fibres en modes de fraisage opposition et avalant.

Les données illustrées dans la figure 3.6 indiquent que le mode de fraisage en opposition produit une rugosité de qualité de la surface supérieure par rapport au mode de fraisage en avalant. De plus, la découpe parallèle à l'orientation des fibres (0°) offre des résultats plus précis en termes de rugosité de surface que la découpe perpendiculaire à l'orientation des fibres (90°). Des observations similaires ont été rapportées par Slamani et al. [25, 124] ainsi que Chegiani et al. [125] lors du fraisage de composites renforcés par des fibres de lin. Les figures 3.7 et 3.8 expliquent l'évolution de la rugosité de surface (R_a) pour une orientation à 90° en fonction de la vitesse de l'avance (f) à différentes vitesses de coupe pour le détournage (up-milling) et (down-milling) respectivement.

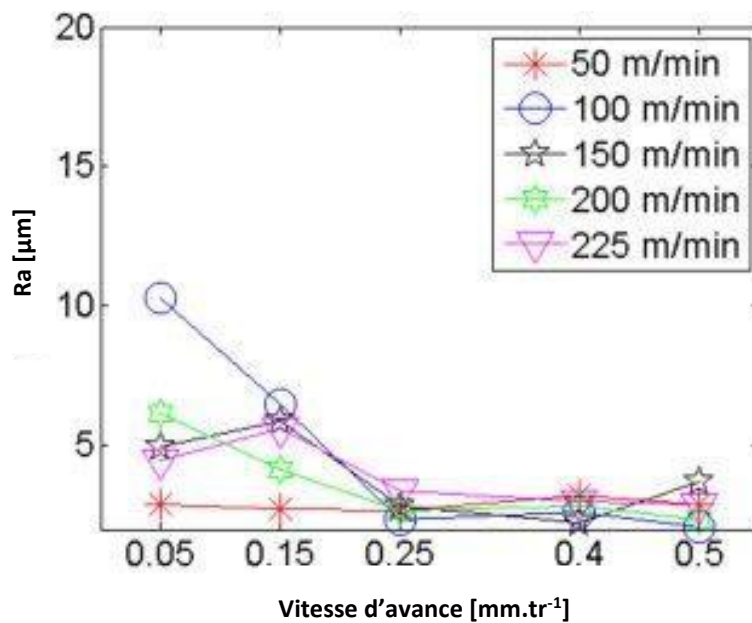


Figure 3.7. R_a en fonction de la vitesse d'avance en mode fraisage opposition à 90° .

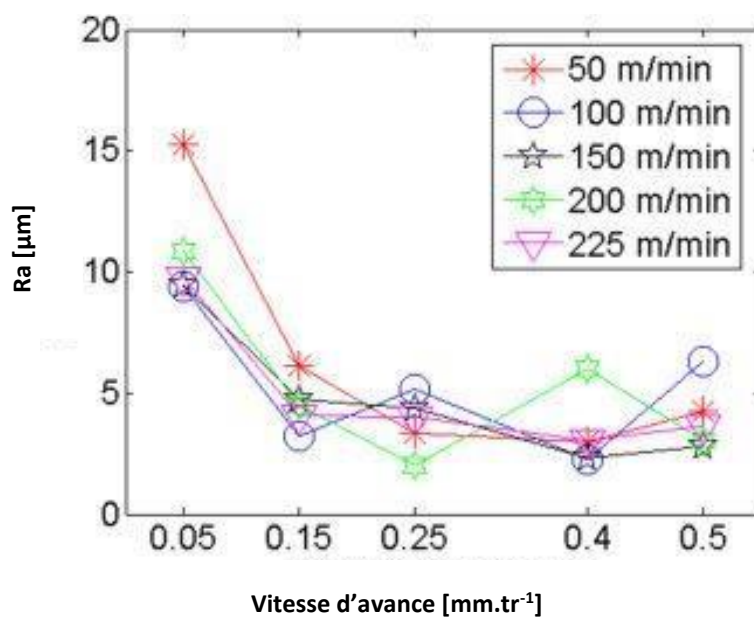


Figure 3.8. R_a en fonction de la vitesse d'avance en mode fraisage avalant à 90° .

Dans cette illustration, on observe une évolution similaire de la rugosité de surface pour les deux méthodes d'usinage. Généralement, la rugosité diminue à mesure que la vitesse d'avance augmente, atteignant des valeurs faibles à des vitesses d'avance élevées. Il est important de noter que la vitesse de coupe de 50 m/min, associée à de faibles vitesses d'avance, conduit à des surfaces très rugueuses

par rapport aux autres vitesses d'avance. Cependant, au-delà d'une vitesse d'avance de 0,25 mm/tr, les surfaces usinées présentent une faible rugosité.

De plus, le fraisage en mode opposition demeure plus efficace que le fraisage avalant pour différentes vitesses de coupe. Des observations similaires ont été faites lors du placement parallèle à la fibre (figures 3.9 et 3.10).

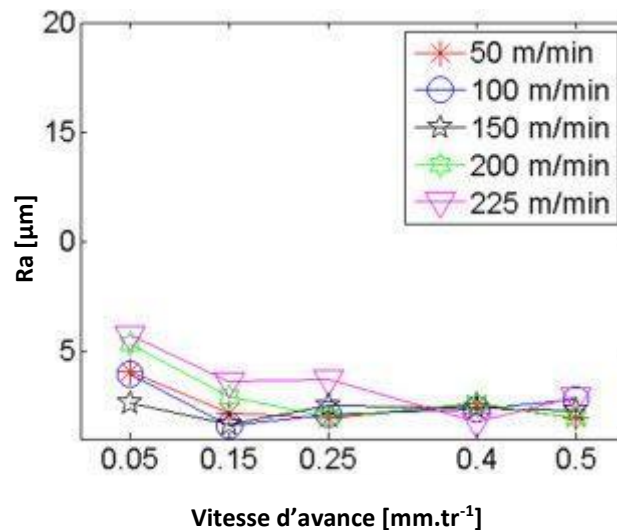


Figure 3.9. Ra en fonction de la vitesse d'avance en mode fraisage opposition à 0° .

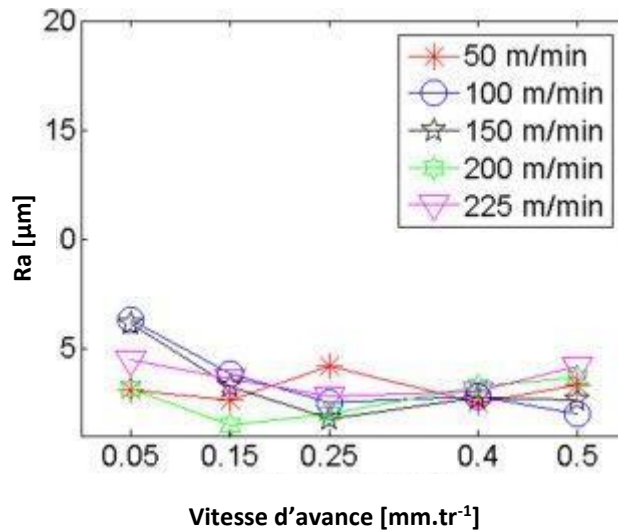


Figure 3.10. Ra en fonction de la vitesse d'avance en mode fraisage avalant à 0° .

Cependant, lorsqu'on examine de manière plus approfondie ces données, on constate que l'alignement des fibres à un angle de 0° offre de meilleurs résultats en ce qui concerne la rugosité de surface (Ra).

Les graphiques 3.11, 3.12, 3.13 et 3.14 illustrent la variation de la rugosité de surface (Ra) en

relation avec la vitesse de coupe (V_c) lors de l'usinage en mode de fraisage à en opposition et en mode de fraisage en avalant, avec une orientation des fibres de 90° et 0° respectivement.

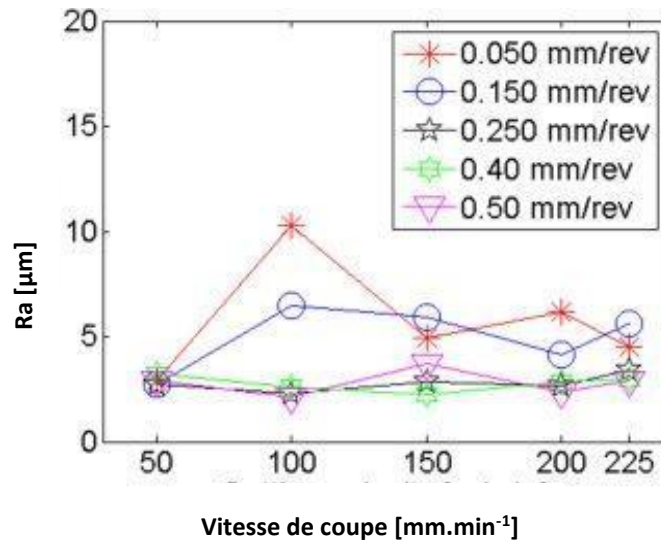


Figure 3.11. R_a en fonction de la vitesse de coupe (V_c) en mode fraisage opposition à 90° .

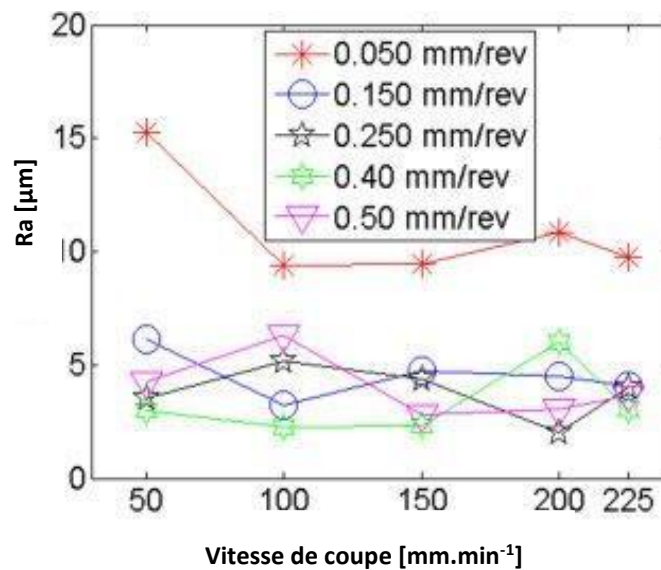


Figure 3.12. R_a en fonction de la vitesse de coupe (V_c) en mode fraisage avalant à 90° .

Il est évident, d'après ces graphiques, que les valeurs élevées de rugosité de surface sont généralement observées à des avances faibles, quelle que soit la vitesse de coupe. En revanche, pour des avances supérieures à 0,25 mm/tr, on constate des valeurs faibles de rugosité, indépendamment de la vitesse de coupe.

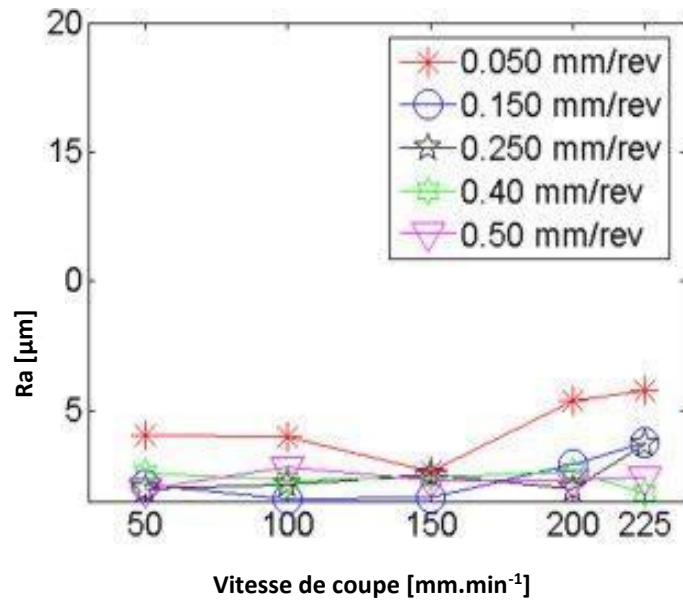


Figure 3.13. Ra en fonction de la vitesse de coupe (V_c) en mode fraisage opposition à 0° .

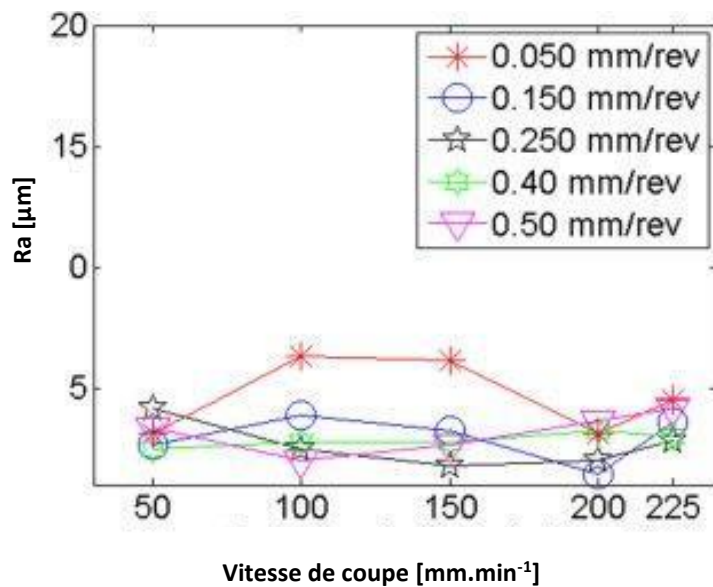


Figure 3.14. Ra en fonction de la vitesse de coupe (V_c) en mode fraisage avalant à 0° .

L'usinage des coupons à orientation 0° offre des meilleurs résultats en terme de la rugosité de surface quel que soit le mode d'usinage (opposition ou avalant).

3.3.1 Analyse des dommages superficiels

Les matériaux composites se caractérisent généralement par l'apparition de fibres non coupées, la déchirure des particules de matériau et la détérioration thermique de la résine. Les défauts observés lors de la fabrication sont variables, et sont dus à la propriété spécifique du matériau. Le délaminage et les dommages superficiels sont des défauts courants. Généralement, le défaut est quantifié par la mesure de la rugosité. En revanche, ce critère ne représente pas vraiment les dommages provoqués lors de l'usinage. En fonction des dommages subis par la surface usinée, le critère habituellement utilisé (la rugosité Ra) n'est pas toujours corrélé à l'étendue des dommages observés visuellement, notamment les dommages à l'intérieur de composite (détachement des fibres, fissures, arrachement). Ainsi, la localisation et la répartition des dommages sur la surface usinée ne sont généralement pas représentées par la rugosité, pour cela d'autres critères de qualification des défauts d'usinage sont requis. Une analyse microscopique est nécessaire pour confirmer l'absence de dommages de surface lorsque le paramètre Ra est utilisé pour indiquer le niveau de rugosité de la surface. Il est essentiel d'identifier ce défaut pour confirmer la viabilité de l'utilisation de ce matériau en tant qu'option aux fibres synthétiques.

3.3.2 Analyse de la qualité des surfaces par microscope optique

Suite à la découpe des échantillons, les surfaces usinées sont inspectées à l'aide d'un microscope optique afin d'évaluer visuellement l'impact des paramètres de coupe sur la qualité de la surface. Ceci permet également d'observer la manière dont les fibres sont coupées en fonction de leur orientation. On remarque la présence de résine qui a fondu et s'est fixée. (Figure 3.15).

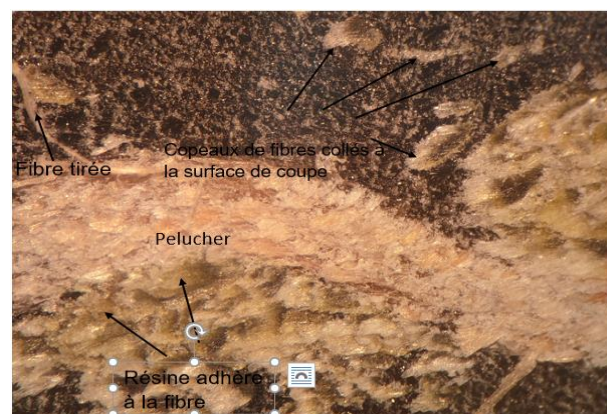


Figure 3.15. Image des défauts d'usinage rencontrés lors du détourage composite de fibres Alfa.

Certaines particules de fibres Alfa sont observées adhérant à la surface de coupe. Sur certains échantillons usinés, on remarque clairement la présence de dommages thermiques (Figure 3.16).

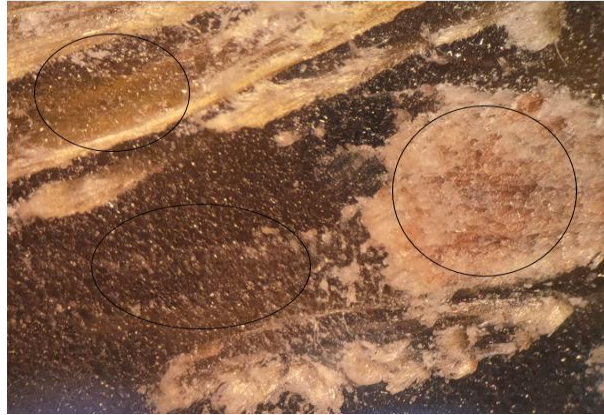


Figure 3.16. Dommages thermiques de la matrice et des fibres.

Aucune distinction entre les plis n'est visible, ce qui indique une altération de la matrice. Il est également évident que la température de transformation a été atteinte à la surface, provoquant la fusion de la résine et une uniformisation de la surface.

Des fibres brisées résiduelles, des résine solidifiées et stabilisées, des cavités, ainsi qu'une dégradation de la matrice, sont également observées sur certaines des surfaces découpées (Figure 3.17).

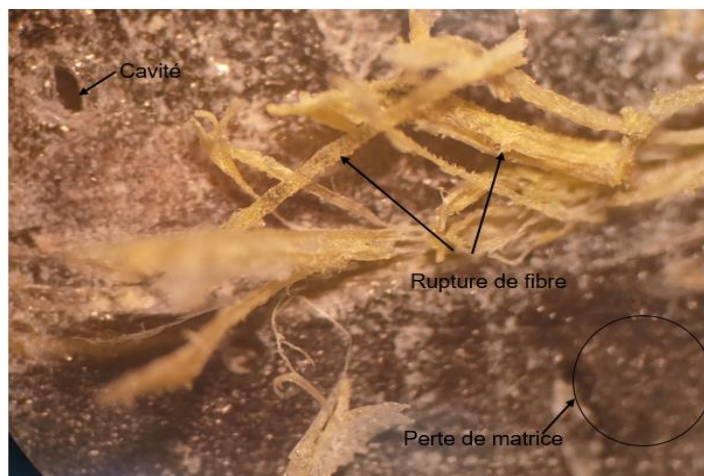


Figure 3.17. Illustration mettant en évidence la présence de cavités, la rupture des fibres et la dégradation de la matrice.

La Figure 3.18 présente une représentation visuelle des surfaces usinées des échantillons, obtenue en réalisant une coupe perpendiculaire aux fibres. Ceci a été réalisé en utilisant les modes de fraisage

en opposition (up milling) et en avalant (down milling), le tout dans des conditions de coupe équivalentes.



Figure 3.18. Mode de fraisage en avalant et mode de fraisage en opposition lors d'une coupe perpendiculaire à la fibre, **a)** Mode de fraisage en opposition perpendiculaire à la fibre, $f=0.4\text{mm/rev}$ et $V_c = 100\text{m/min}$, **b)** Mode de fraisage en avalant perpendiculaire à la fibre, $f=0.4\text{mm/rev}$ et $V_c = 100\text{m/min}$

Au regard de ces images, le fraisage en opposition engendre des surfaces plus nettes (moins rugueuses) par rapport au fraisage an avalant.

À la lumière de ces observations visuelles, il est évident que le fraisage en opposition conduit à des surfaces plus nettes, présentant une rugosité réduite en comparaison avec le fraisage en avalant. Les résultats obtenus avec le mode de coupe en opposition démontrent une performance supérieure, se traduisant par des surfaces plus lisses par rapport au mode en avalant, ainsi qu'une réduction de la présence de fibres non coupées dans les deux orientations de coupe. Il est intéressant de souligner que, à une vitesse d'avance plus élevées, on observe une diminution de la quantité de fibre non coupée, tandis qu'à des vitesses d'avance plus basses, cette quantité augmente. Toutefois, il convient de noter que l'impact de cette variation de vitesse d'avance sur la présence de fibre non coupée demeure relativement modéré. Ces constatations soulignent l'efficacité notable du fraisage en opposition dans la réalisation de surfaces usinées de haute qualité, mettant en évidence son avantage par rapport au fraisage en avalant, particulièrement en termes de réduction de la rugosité et de la présence de fibre non coupée.

3.3.3 Analyse de la qualité des surfaces par microscopie électronique à balayage (MEB)

La Figure 3.19 présente des observations en microscopie électronique à balayage (MEB) d'une surface usinée du matériau composite époxy/Alfa. Cette image MEB révèle des caractéristiques distinctes qui fournissent des informations précieuses sur le comportement de l'usinage [126, 127].

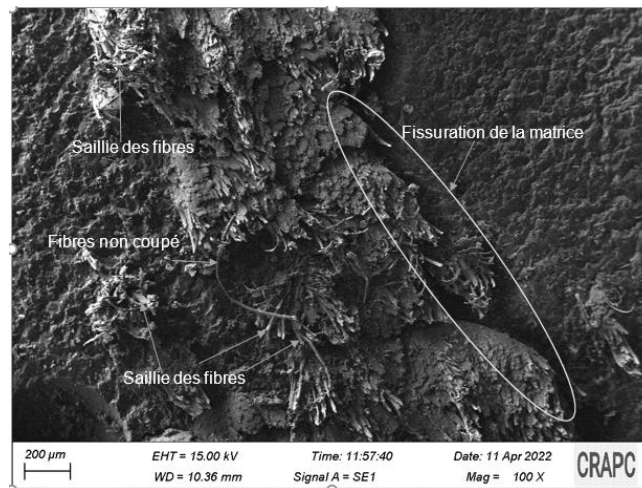


Figure 3.19. Image MEB typique de la surface découpée en Epoxy/Alfa composite.

Après un examen attentif, il devient évident que la surface usinée présente plusieurs caractéristiques remarquables.

En premier lieu, on observe une saillie des fibres, ce qui indique des variations dans la hauteur des fibres à la surface, ces variations pourraient être attribuées à des forces de coupe irrégulières agissant sur le composite pendant le processus d'usinage. De plus, la force dynamique initiale provoque des dommages initiaux dans le stratifié, entraînant une déformation des fibres plutôt qu'une coupe complète. En d'autres termes, les fibres plient ou s'écartent, ce qui les empêche d'être coupées complètement, puis elles reprennent leur position d'origine dans le matériau composite, créant ainsi des fibres en saillie à la surface usinée.

En deuxième lieu, la présence de fibres non coupées est perceptible, ce qui suggère que l'outil de coupe n'a peut-être pas coupé efficacement certaines fibres, ce qui a entraîné un enlèvement de matière incomplet. Il est possible que la présence de fibres non coupées puisse être attribuée à la nature ductile des fibres, tandis que l'arrachement des fibres peut être la conséquence d'une liaison inadéquate entre les fibres et la matrice. Ce constat met en évidence la nécessité d'optimiser les paramètres de coupe afin d'atteindre un usinage plus précis et uniforme.

Présence des fissures au niveau de la matrice sont clairement visibles sur l'image obtenue par microscopie électronique à balayage (MEB), ce qui témoigne de l'émergence de dommages matériels pendant le processus de détournage. Ces fissures sont vraisemblablement dues aux contraintes générées par les forces de coupe et pourraient avoir des répercussions sur les propriétés mécaniques globales du matériau composite.

La figure 3.20 montre une image MEB haute résolution qui met en évidence les défauts spécifiques observés dans le matériau composite époxy/Alfa.

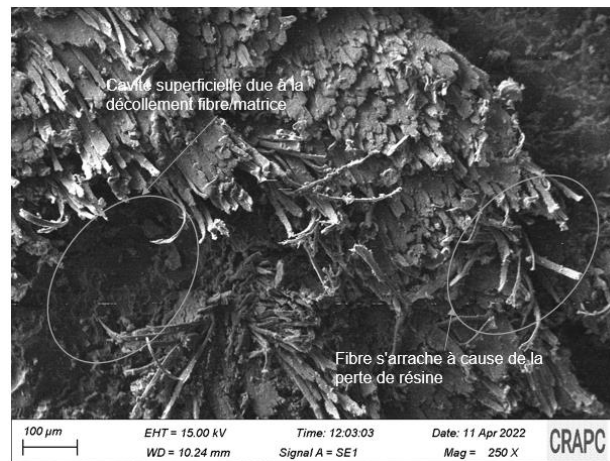


Figure 3.20. Image MEB haute résolution révélant des défauts spécifiques dans le matériau composite
Époxy /Alfa.

Cette illustration offre une vue approfondie du comportement de l'usinage du matériau, apportant une compréhension complète des défauts observés en démontrant la présence de cavités en surface. Ces cavités superficielles indiquent des dommages sous-jacents et peuvent résulter de divers facteurs tels que la séparation des fibres, la perte de matrice, le délaminage intercouche et le décollement de la matrice de fibres souterraine, comme indiqué dans les références [128, 129]. En outre, Wang et al. [130] ont affirmé que l'initiation et la propagation du décollement de la matrice de fibres constituaient la principale cause des cavités de surface, entraînant par la suite des fractures des fibres induites par la flexion et le cisaillement.

3.4 CONCLUSION

Dans cette expérimentation présentée dans ce chapitre, le but était d'évaluer l'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface et les dommages apparents lors du découpage d'un matériau composite Epoxy/Alfa à l'aide d'un outil de coupe ARS. Les conclusions découlant de cette étude sont les suivantes :

Le mode de coupe en avalant, lorsqu'il est appliqué au processus de détournage du matériau composite époxy/Alfa, est déconseillé en raison de ses résultats peu satisfaisants en termes de rugosité de surface et de dommages superficiels. En effet, cette méthode de coupe tend à engendrer une surface rugueuse, tout en exacerbant les dommages à la superficie du matériau. Cette approche peut entraîner une détérioration accrue de la qualité de la surface, compromettant ainsi les propriétés esthétiques et fonctionnelles du matériau final. Par conséquent, il est fortement recommandé d'opter pour l'autre mode de coupe plus adaptés, tels que le fraisage en opposition, afin d'obtenir des résultats de coupe plus optimaux tout en préservant l'intégrité du matériau composite époxy/Alfa. Cette considération revêt une importance particulière dans le contexte de l'usinage de ce type de matériau, où la préservation des propriétés structurelles et de la qualité de la surface demeure une priorité cruciale pour assurer la performance globale du composant final

L'effet de la vitesse de coupe s'est avéré négligeable lorsque la coupe est effectuée parallèlement aux fibres (c'est-à-dire avec une orientation des fibres à 0°) en mode avalant. Dans ce cas, la pire rugosité de surface est généralement obtenue avec une faible avance, quelle que soit la vitesse de coupe.

CHAPITRE 4

Analyse statistique de la rugosité de surface des biocomposites

Époxy/fibre Alfa

4.1 INTRODUCTION

Les composites renforcés par des fibres naturelles ont représenté une avancée majeure dans le domaine des matériaux au cours du siècle dernier. Reconnus comme des matériaux respectueux de l'environnement, ils offrent une alternative aux fibres synthétiques plus couramment utilisées. Leur utilisation a connu une croissance significative ces dernières années dans divers secteurs industriels tels que l'automobile [131, 132] et la marine [127, 133]. La demande croissante de matériaux plus respectueux de l'environnement et biodégradables, pour répondre aux attentes de la société, a stimulé des avancées dans le domaine des matériaux et de la biodégradabilité. Parmi les aspects les plus importants et intéressants de ces matériaux, on trouve l'utilisation des fibres naturelles dans les polymères [134,135].

Dans de nombreuses applications industrielles, la qualité des pièces fabriquées est un impératif absolu. Elle se mesure non seulement par l'exactitude dimensionnelle, incluant la géométrie de l'outil de coupe et l'orientation des fibres [136], mais aussi par la qualité des surfaces usinées. Diverses études ont été menées pour explorer l'impact des paramètres de coupe sur la qualité de surface (mesurée par Ra) des matériaux composites, bien que ces études aient principalement porté sur des composites différents de ceux étudiés ici. Parmi ces recherches, on peut citer les travaux de Slamani et al [137].

Dans cette section, l'objectif principal était d'examiner comment différents paramètres de coupe affectent la rugosité de la surface des composites fabriqués à partir de ces fibres d'alfa. Plus précisément, l'attention a été portée sur le paramètre de rugosité superficielle, mesuré en termes de Ra (rugosité arithmétique).

Le processus d'usinage a consisté en des opérations de découpe à sec sur des plaques composites contenant des fibres d'alfa et de la résine époxy, utilisant un outil de coupe en acier rapide (ARS). Plusieurs combinaisons de paramètres de coupe ont été testées, y compris des variations de la vitesse de coupe, de l'avance, et de l'orientation des fibres dans les composites.

L'analyse statistique, en particulier l'analyse de la variance (ANOVA), a été employée pour traiter et interpréter les résultats des expérimentations. L'objectif était de sélectionner les modèles statistiques les plus appropriés pour décrire l'effet des paramètres de coupe sur la rugosité de surface, qui est un indicateur crucial de la qualité de l'usinage. Cette analyse statistique a permis de quantifier comment chaque paramètre de coupe influençait la rugosité, et de déterminer leur impact sur les caractéristiques de la surface des biocomposites.

Finalement, l'objectif de ce chapitre réside dans la fourniture d'informations cruciales pour

l'optimisation du processus de fabrication des biocomposites époxy/Alfa, en mettant un accent particulier sur la qualité de la surface usinée. En analysant en profondeur l'impact des paramètres de coupe sur la rugosité de surface, cette recherche permet de prendre des décisions éclairées visant à améliorer la production de ces matériaux composites. Ces connaissances sont particulièrement précieuses dans des secteurs où une finition de surface de haute qualité est essentielle.

4.2 LES DONNÉES

Un jeu de données a été tiré lors de l'usinage des différents coupons, la figure 4.1 illustre la manière dont les coupons ont été usinés.

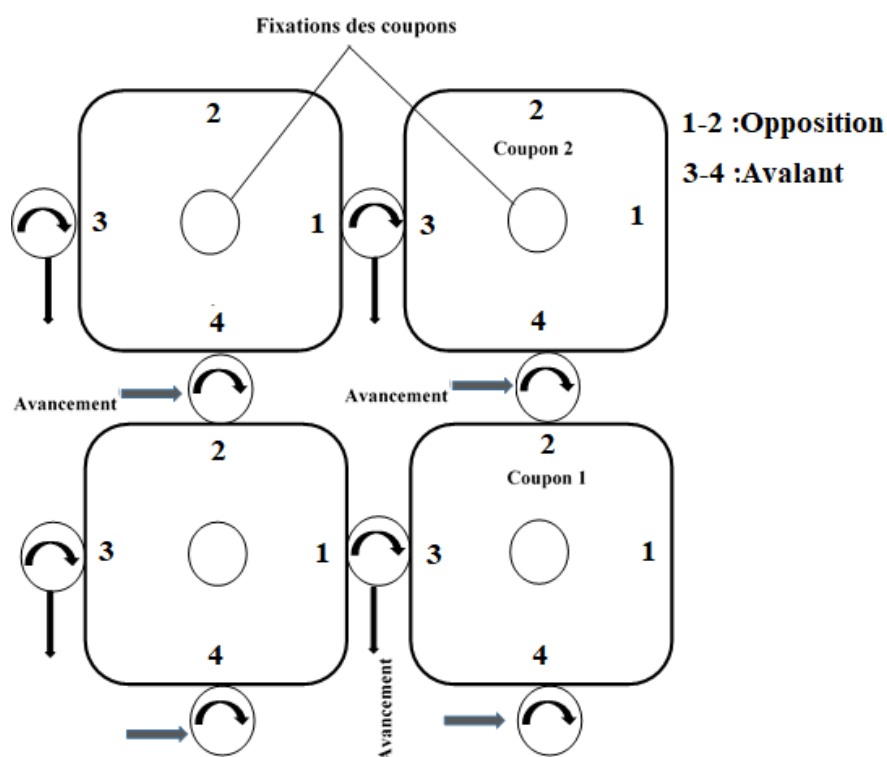


Figure 4.1. Coupons et mode d'usinage.

Les mesures de rugosité comprennent la rugosité moyenne arithmétique (R_a). Trois mesures ont été effectuées pour chaque surface du coupon afin d'obtenir ces valeurs.

4.3 ANALYSE DE LA VARIANCE (ANOVA) POUR LES COMPOSITES NON TRAITÉS PAR NAOH

L'analyse de variance (ANOVA) représente une méthode bien établie et un outil de recherche crucial fréquemment utilisé par les scientifiques. Il s'agit d'une technique applicable aux données

quantitatives, visant à mettre en évidence l'influence des variables explicatives, notamment la vitesse de coupe (V_c), la vitesse d'avance (f), et l'effet de leur interaction ($f \cdot V_c$), sur la variable à expliquer, à savoir la rugosité (R_a), lors de l'établissement de modèles de régression.

Les résultats du test ANOVA sont présentés dans les figures 4.2 (a et b) sous forme de contributions en pourcentage, représentées à l'aide d'histogrammes. Ces résultats concernent respectivement le mode de fraisage en opposition et le mode de fraisage en avalant pour une orientation des fibres de 90° .

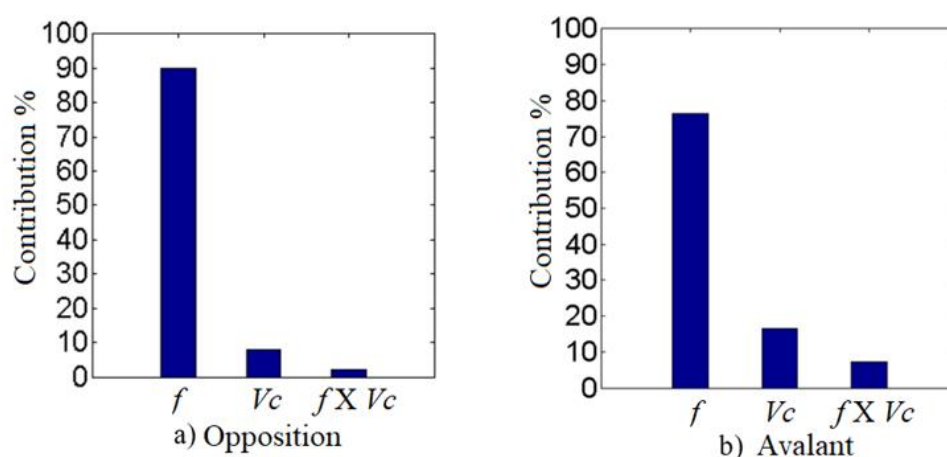


Figure 4.2. Contribution en pourcentage des paramètres de coupe sur la rugosité de surface pour une orientation des fibres à 90° .

Ces graphiques mettent en évidence que l'avance joue un rôle prépondérant, avec une contribution d'environ 90,12 % et 76,35 % pour le mode de fraisage opposition et avalant, respectivement. Ensuite, la vitesse de coupe montre des valeurs d'environ 7,8 % et 16,42 %, respectivement. Enfin, l'effet d'interaction entre la vitesse d'avance et la vitesse de coupe contribue d'environ 2,08 % et 7,23 %, respectivement.

Pour l'orientation des fibres à 0° , on constate que, dans le mode de fraisage en avalant (Fig. 4.3. b), la vitesse de coupe et la vitesse d'avance présentent la contribution la plus élevée, avec des valeurs de 62,72 % et 15,97 %, respectivement. Ensuite, l'effet d'interaction entre la vitesse d'avance et la vitesse de coupe contribue avec une valeur de 21,31 %. En revanche, il est notable que l'effet de la vitesse d'avance est négligeable (0,45 %) lors du détournage parallèle aux fibres (orientation des fibres à 0°) en mode opposition (Fig. 4.3 a).

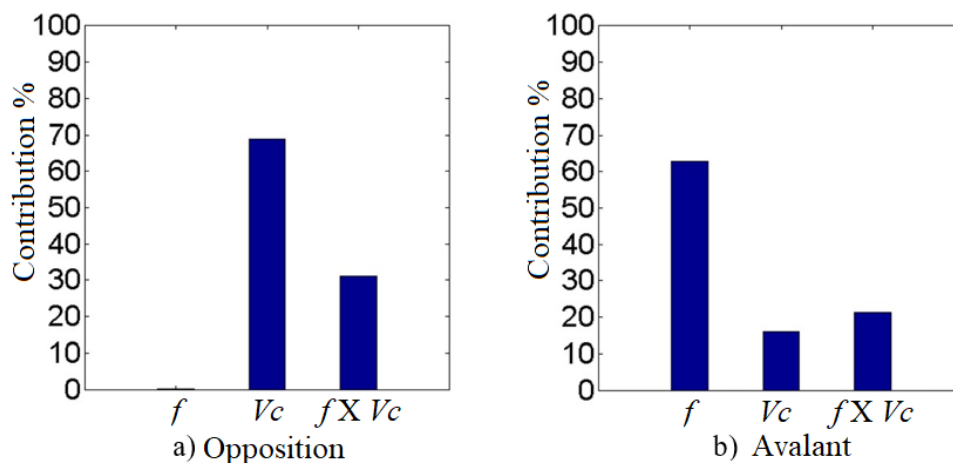


Figure 4.3. Contribution en pourcentage des paramètres de coupe sur la rugosité de surface pour une orientation des fibres à 0°.

Ainsi, la vitesse de coupe émerge comme le paramètre le plus crucial, avec une contribution d'environ 67,01%, suivie de l'effet d'interaction entre la vitesse de coupe et la vitesse d'avance à 32,54%.

4.4 ANALYSE DE LA VARIANCE (ANOVA) POUR LE COMPOSITE TRAITÉ PAR (NaOH)

Les contributions, en pourcentage, des variables explicatives des surfaces usinées en opposition et en avalant pour coupons à orientation 0° et 90° sont présentées par les figures 4.4.

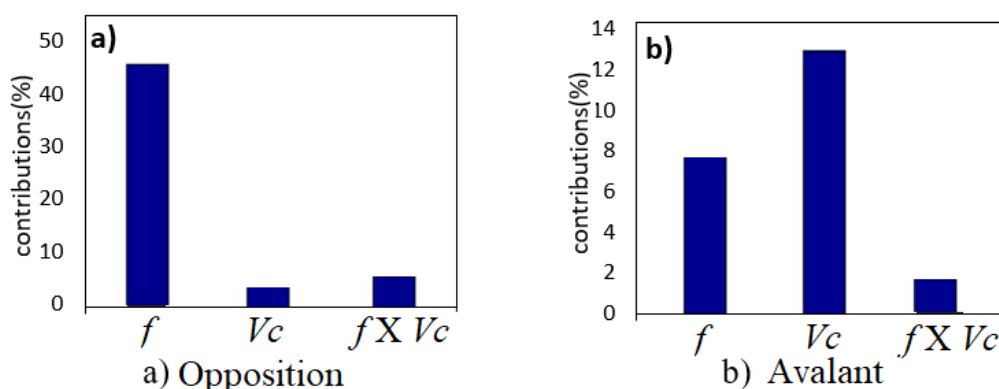


Figure 4.4. Contribution en pourcentage des paramètres de coupe sur la rugosité de surface pour une orientation des fibres à 0° et traitées par NaOH: a) usinage en opposition, b) usinage en avalant.

La contribution de la vitesse d'avance (f) sur la rugosité des surfaces usinées en opposition, avec une orientation des fibres de 0°, est très importante, elle est de 46.09%. En revanche, les deux

autres variables (V_c et $V_c \times f$) présentent des contributions plus modestes. Pour l'usinage en avalant, nous notons des contributions de 8,57% pour la vitesse d'avance (f) et 14,61% pour la vitesse de coupe (V_c).

La figure 4.5 donne les résultats graphiques de l'analyse de la variance du composite à fibres orientées à 90° , lors de l'usinage, traitées à la NaOH.

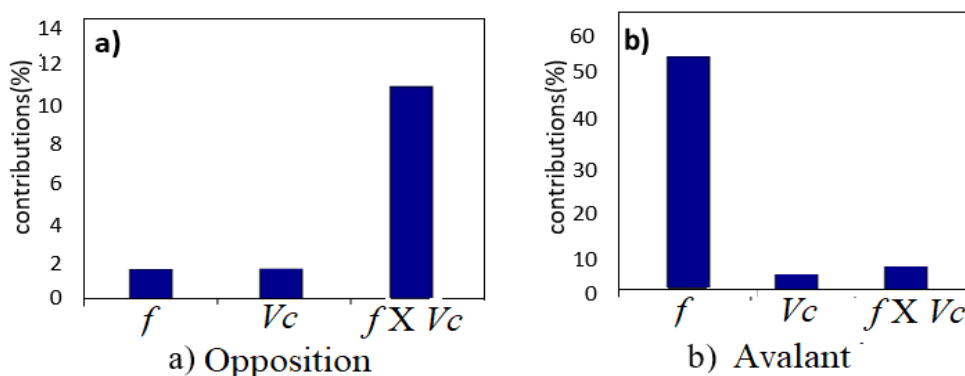


Figure 4.5. Contribution en pourcentage des paramètres de coupe sur la rugosité de surface pour une orientation des fibres à 90° et traitées par NaOH: a) usinage en opposition, b) usinage en avalant.

La contribution de la vitesse d'avance atteint 50,18% lors de l'usinage en avalant, ce qui est significatif. En revanche, pour l'usinage en opposition, seul l'effet de l'interaction semble influencer la rugosité (R_a). Il semble que la vitesse d'avance soit le facteur prédominant pour l'état de surface (R_a) lors de l'usinage en avalant.

4.5 THEORIE DE LA REGRESSION MULTIPLE MODELE CUBIQUE

La structure du modèle de régression proposé dans cette étude peut inclure plusieurs termes, en tenant compte des effets d'interaction, et est formulée de la manière suivante :

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 \times f_i + \beta_2 \times V_{c_i} + \beta_3 \times f_i \times V_{c_i} + \beta_4 \times f_i^2 + \beta_5 \times V_{c_i}^2 + \beta_6 \times f_i \times V_{c_i}^2 + \beta_7 \times V_{c_i} \times f_i^2 + \beta_8 \times f_i^3 + \beta_9 \times V_{c_i}^3 + \varepsilon_i \quad (4.1)$$

Avec

f : vitesse d'avance.

V_c : vitesse de coupe.

ε_i : les résidus aléatoire.

L'écriture matriciel, l'équation du modèle régressif s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_1 & \dots & \dots & \dots & V_{C1}^3 \\ 1 & f_2 & \dots & \dots & \dots & V_{C2}^3 \\ 1 & f_1 & \dots & \dots & \dots & V_{C3}^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & f_n & \dots & \dots & \dots & V_{Cn}^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_n \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Donc

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (4.3)$$

Les coefficients de régression (β) sont estimés par :

$$\hat{\beta} = (X \cdot X)^{-1}XY \quad (4.4)$$

4.5.1 Etablissement du modèle pour le composite non traités par NaOH

4.5.1.1 Modèle global pour un usinage en opposition avec effet orientation (0° et 90°)

L'incorporation de l'orientation des fibres du composite lors de l'usinage en opposition (up milling) dans la création du modèle de régression se réalise de la manière suivante :

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 \times f_i + \beta_2 \times Vc_i + \beta_3 \times f_i \times Vc_i + \beta_4 \times f_i^2 + \beta_5 \times Vc_i^2 + \beta_6 \times f_i \times Vc_i^2 + \beta_7 \times Vc_i \times f_i^2 + \beta_8 \times f_i^3 + \beta_9 \times Vc_i^3 + \beta_{10} \times D + \varepsilon_i \quad (4.5)$$

Avec :

$$D = \begin{cases} 1 & \text{pour une orientation des fibres } 0^\circ \\ 0 & \text{pour une orientation des fibres } 90^\circ \end{cases}$$

Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1. Résultats de la régression pour un usinage en opposition (non traitées).

source	Paramètres estimés	Erreurs standard	Test student	P value
Intercept	9.952e+00	3.661e+00	2.719	0.008429 **
Vitesse d'avance (f)	-6.568e+01	2.161e+01	-3.039	0.003436 **
Vitesse de coupe (Vc)	3.061e-02	8.497e-02	0.360	0.719889
Interaction Vc.f	1.030e-01	1.446e-01	0.713	0.478604
f ²	1.584e+02	7.314e+01	2.165	0.034096 *
Vc ²	-3.751e-04	6.478e-04	-0.579	0.564558
f Vc ²	-1.023e-04	4.082e-04	-0.251	0.802974
Vc f ²	-1.328e-01	1.586e-01	-0.837	0.405546
f ³	-1.153e+02	8.460e+01	-1.362	0.177828
Vc ³	1.037e-06	1.552e-06	0.668	0.506505
D	-1.782e+00	4.379e-01	-4.070	0.000131 ***

Nous observons dans le tableau précédent que l'intercepte, la vitesse d'avance (f) et le paramètre D sont fortement significatifs, étant donné que la valeur P est inférieure au seuil de signification $\alpha = 5\%$. L'équation du modèle de régression résultant de ce calcul est présentée dans l'équation (5.6).

$$\mathbf{Ra} = 9,952 - 6,57f + 3,061 \cdot 10^{-2}V_c + 1,103V_c \cdot f + 1,584 \cdot 10^2 f^2 - 3,75 \cdot 10^{-4}V_c^2 - 1,023 \cdot 10^{-4}f \cdot V_c^2 - 1,328 \cdot 10^{-1}V_c \cdot f^2 - 1,153 \cdot 10^2 f^3 + 1,037 \cdot 10^{-6}V_c^3 - 1,782D \quad (5.6)$$

Le test global : R² est significatif ? le modèle est-il intéressant ?

Hypothèses :

$$H_0 : \forall j = 1 \dots p, \beta_j = 0$$

$$H_1 : \exists j = 1 \dots p, \beta_j \neq 0$$

La statistique du test :

$$F_{obs} = \frac{\frac{(SCM)}{p}}{\frac{(SCR)}{n-p-1}} = \frac{CMm}{CMr}$$

n: taille de l'échantillon

p : degrés de liberté du modèle.

$$n - p - 1 = 64$$

Sous H_0 $L(F_{obs}) = F_{n-p-1}^p$, la statistique F_{obs} suit la loi de Fisher

Décision : si $F_{obs} > F_{n-p-1, (1-5\%)}^p$, H_0 rejetée au seuil de 5%

F-statistique: 7.583.

$$F_{n-p-1}^p = 1.98 \text{ (lu sur la table Fisher)}$$

Donc:

$$F - \text{statistique: } 7.583 > F_{n-p-1}^p = 1.98$$

On rejette l'hypothèse H_0 ou la P-value 7.79e-08 qui inférieure à 5% .

$R^2 = 0.5423$ est significatif.

On peut conclure que le modèle régressif établi est significatif.

Test sur les coefficients régressifs

Hypothèses :

Hypothèse nulle $H_0: \beta_j = 0$

Hypothèse alternative $H_1: \beta_j \neq 0$

Sous H_0 la variable β_j n'apporte pas d'information supplémentaire pour 'explication de R_a .

La statistique du test de Student : $T_{obs} = \frac{\beta_j}{\hat{\sigma}_{\beta_j}}$

La loi de la statistique de test sous H_0 : $L(T_{obs}) = T_{n-p-1}$

Décision :

$$|T_{obs}| > t_{n-p-1} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \rightarrow \text{rejet de } H_0 \text{ au seuil de 5\%}$$

Sachant que sur la table de student

$$t_{n-p-1} \left(1 - \frac{5}{2}\right) = 1.96$$

On rejette l'hypothèse H_0 pour la vitesse d'avance et l'intercepte du fait que $|T_{obs}| > t_{64} \left(1 - \frac{5}{2}\right)$

La vitesse d'avance est significative au regard de la P-value qui est inférieure à 5%.

4.5.1.2 Modèle global pour un usinage en avalant (down milling) avec effet orientation (0° et 90°)

Le tableau 4.2 présente les résultats de la régression.

Tableau 4.2. Résultats de la régression pour un usinage en avalant (non traitées).

source	Paramètres estimés	Erreurs standard	Test student	P value
Intercepte	1.397e+01	4.471e+00	3.124	0.003362 **
Vitesse d'avance (f)	-8.198e+01	2.637e+01	-3.108	0.003505 **
Vitesse de coupe (Vc)	-4.779e-03	1.037e-01	-0.046	0.963475
Interaction Vc.f	7.335e-02	1.764e-01	0.416	0.679857
f ²	2.153e+02	8.925e+01	2.413	0.020633 *
Vc ²	-1.539e-04	7.905e-04	-0.195	0.846617
fVc ²	1.127e-05	4.982e-04	0.023	0.982072
Vc f ²	-8.971e-02	1.935e-01	-0.464	0.645456
f ³	-1.784e+02	1.032e+02	-1.728	0.091855
Vc ³	5.027e-07	1.894e-06	0.265	0.792079
D	-2.068e+00	5.038e-01	-4.106	0.199 ***

Le modèle issu du tableau est le suivant :

$$Ra = 1,397.10^1 - 8,198.10^1 f - 4,779.10^{-3} V_c + 7,335.10^{-2} V_c. f + 2,153.10^2 f^2 - 1,53.10^{-4} V_c^2 + 1,127.10^{-5} f. V_c^2 - 8,971.10^{-2} V_c. f^2 - 1,784.10^2 f^3 + 5,027.10^{-7} V_c^3 - 2,068D$$

Avec :

$$D = \begin{cases} 1 & \text{pour une orientation des fibres } 0^\circ \\ 0 & \text{pour une orientation des fibres } 90^\circ \end{cases}$$

F – statistique: $6.78 > F_{n-p-1}^p = 2.09$

$R^2 = 0.6348$ est significatif puisque la P-value $5.205e-06$ qui inférieure à 5%.

On peut conclure que le modèle régressif établi est significatif.

Les autres résultats sont présentés dans ce qui suit :

Tableau 4.3. Résultats de la régression pour différent mode d'usinage (non traités).

Mode usinage	modèles	R ²	F	p-value	Décision
Up milling	0° Ra = 6,04 - 39f - 7,7. 10 ⁻³ V _C + 0,122V _C . f + 110,1f ² - 1,45. 10 ⁻⁴ V _C ² - 5,85. 10 ⁻⁴ f. V _C ² + 2,76. 10 ⁻² V _C . f ² - 122,2f ³ + 9,529. 10 ⁻⁷ V _C ³	0.84	8.44	0.0001902	Significatif
	90° Ra = 11,02 - 79,02f + 4,976. 10 ⁻² V _C + 9,35. 10 ⁻² V _C . f + 182,5f ² - 4,9. 10 ⁻⁴ V _C ² + 1,394. 10 ⁻⁴ f. V _C ² - 0,212. V _C . f ² - 116,8f ³ + 1,079. 10 ⁻⁶ V _C ³	0.557	5.58	2.014e-05	Significatif
Up milling et down milling	0° Ra = 3.13 - 25.75f + 6.281. 10 ⁻² V _C - 4.491. 10 ⁻² V _C . f + 87,57f ² - 5,229. 10 ⁻⁴ V _C ² + 3.992. 10 ⁻⁶ f. V _C ² + 7,425. 10 ⁻² V _C . f ² - 92,22f ³ + 1,364. 10 ⁻⁶ V _C ³	0.5317	5.045	0.0001462	Significatif
down milling	0° Ra = -1,26 - 8,948f + 1,683. 10 ⁻¹ V _C - 3,09. 10 ⁻¹ V _C . f + 69,79f ² - 1,072. 10 ⁻⁴ V _C ² + 8,762. 10 ⁻⁴ f. V _C ² + 1,549. 10 ⁻¹ V _C . f ² - 80,21f ³ + 2,048. 10 ⁻⁶ V _C ³	0.6515	3.116	0.02522	Significatif
down milling	90° Ra = 27,12 - 155f - 1,779. 10 ⁻¹ V _C + 4,557. 10 ⁻¹ V _C . f + 36,9f ² + 7,645. 10 ⁻⁴ V _C ² - 8,537. 10 ⁻⁴ f. V _C ² - 3,34310 ⁻¹ V _C . f ² - 276,6f ³ - 1,043. 10 ⁻⁶ V _C ³	0.8586	10.12	6.512e-05	Significatif

4.5.2 Établissement du modèle pour le composite traité par NaOH

Étant donné l'impact du mode d'usinage sur la rugosité des surfaces, il a été constaté que le mode opposition (up milling) génère des rugosités plus fines par rapport au mode avalant (down milling). Ainsi, il est pertinent d'établir des modèles de régression en fonction du mode d'usinage tout en prenant en considération l'orientation des fibres qui composent le matériau composite, à savoir (0° et 90°).

4.5.2.1 Modèle global pour un usinage en avalant avec effet orientation (0° et 90°)

Le mode d'usinage avalant offre des rugosités moins meilleures, les résultats de la régression sont donnés par le tableau 4.4.

Tableau 4.4. Résultats de la régression pour un usinage en avalant (traitées).

source	Paramètres estimés	Erreurs standard	Test student	P value
Intercepte	1.975e+01	5.881e+00	3.359	0.00176 **
Vitesse d'avance (f)	-1.593e+02	3.469e+01	-4.593	4.48e-05 ***
Vitesse de coupe (Vc)	6.184e-02	1.364e-01	0.453	0.65278
Interaction Vc.f	1.535e-01	2.321e-01	0.661	0.51228
f ²	4.152e+02	1.174e+02	3.537	0.00106 **
Vc ²	-7.524e-04	1.040e-03	-0.724	0.47363
f Vc ²	1.066e-03	6.553e-04	1.626	0.11202
Vc f ²	-7.921e-01	2.545e-01	-3.112	0.00347 *
f ³	-2.489e+02	1.358e+02	-1.833	0.07443
Vc ³	1.396e-06	2.491e-06	0.560	0.57847
D	-3.428e-01	6.627e-01	-0.517	0.60788

Le modèle ressorti au terme du tableau est le suivant :

$$Ra = 1,975.10^1 - 1,593.10^3 f + 6,184.10^{-2} V_c + 1,535.10^{-1} V_c. f + 4,152.10^2 f^2 - 7,524.10^{-4} V_c^2 + 1,066.10^{-3} f. V_c^2 - 7,921.10^{-1} V_c. f^2 - 2,489.10^2 f^3 + 1,396.10^{-6} V_c^3 - 3,428D$$

Avec :

$$D = \begin{cases} 1 & \text{pour une orientation des fibres } 0^\circ \\ 0 & \text{pour une orientation des fibres } 90^\circ \end{cases}$$

$R^2 = 0.7084$ est statistiquement significatif, étant donné que la valeur P ($9.718e-08$) est inférieure à 5%. Il est important de noter que le modèle explique 70% des informations. En conclusion, le modèle de régression établi est significatif.

4.5.2.2 Modèle global pour un usinage en opposition avec effet orientation (0° et 90°)

Les résultats de calcul sont donnés dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5. Résultats de la régression pour un usinage en opposition (traitées).

source	Paramètres estimés	Erreurs standard	Test student	P value
Intercepte	1.805e+01	6.051e+00	2.983	0.0049 **
Vitesse d'avance (f)	-7.779e+01	3.570e+01	-2.179	0.0354 *
Vitesse de coupe (Vc)	-1.051e-01	1.403e-01	-0.749	0.4586
Interaction Vc.f	2.564e-01	2.388e-01	1.074	0.2895
f^2	1.347e+02	1.208e+02	1.115	0.2718
V_c^2	4.034e-04	1.070e-03	0.377	0.7082
fV_c^2	-5.651e-04	6.743e-04	-0.838	0.4071
$V_c f^2$	-6.602e-02	2.619e-01	-0.252	0.8023
f^3	-7.881e+01	1.397e+02	-0.564	0.5760
V_c^3	-4.118e-07	2.564e-06	-0.161	0.8732
D	-7.928e-01	6.819e-01	-1.163	0.2520

$$Ra = 1,805.10^1 - 7,779.10^{+1}f - 1,051.10^{-1}V_c + 2,564.10^{-1}V_c.f + 1,347.10^2f^2 + 4,034.10^{-4}V_c^2 - 5,651.10^{-4}f.V_c^2 - 6,602.10^{-2}V_c.f^2 - 7,881.10^{+1}f^3 - 4,118.10^{-7}V_c^3 - 7,928.10^{-1}D$$

Avec :

$$D = \begin{cases} 1 & \text{pour une orientation des fibres } 0^\circ \\ 0 & \text{pour une orientation des fibres } 90^\circ \end{cases}$$

$R^2 = 0.4434$ est statistiquement significatif, car la valeur P (0.005301) est inférieure à 5%. Il est important de noter que le modèle explique 44,34% des informations. En conclusion, le modèle de régression établi est significatif.

Les résultats de calcul pour les autres modes d'usinage sont présentés dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6. Résultats de la régression pour différent mode d'usinage (traités).

Mode usinage		modèles	R ²	F	p-value	Décision
Up milling	0°	$Ra = 20.58 - 131f - 9,86 \cdot 10^{-2}V_c + 2,509 \cdot 10^{-1} \cdot f + 3,366 \cdot 10^2 f^2 + 4,704 \cdot 10^{-4}V_c^2 - 4,954 \cdot 10^{-4}f \cdot V_c^2 - 1,47 \cdot 10^{-1} \cdot f^2 - 2,912 \cdot 10^2 f^3 + 8,108 \cdot 10^{-7}V_c^3$	0.8877	13.18	1.281e-05	Significatif
Up milling	90°	$Ra = 1,473 - 2,455 \cdot 10^{+1}f - 1,115 \cdot 10^{-1}V_c + 2,619 \cdot 10^{+1} \cdot f - 6,729 \cdot 10^{+1}f^2 + 3,363 \cdot 10^{-4}V_c^2 - 6,347 \cdot 10^{-4}f \cdot V_c^2 + 1,494 \cdot 10^{-2} \cdot f^2 + 1,336 \cdot 10^2 f^3 - 1,285 \cdot 10^{-8}V_c^3$	0.33	0.7	0.6787	Non Significatif
down milling	0°	$Ra = -1,26 - 8,948f + 1,683 \cdot 10^{-1}V_c - 3,09 \cdot 10^{-1} \cdot f + 69,79f^2 - 1,072 \cdot 10^{-4}V_c^2 + 8,762 \cdot 10^{-4}f \cdot V_c^2 + 1,549 \cdot 10^{-1} \cdot f^2 - 80,21f^3 + 2,048 \cdot 10^{-6}V_c^3$	0.65	3.12	0.02522	Significatif
down milling	90°	$Ra = 27,12 - 155f - 1,779 \cdot 10^{-1}V_c + 4,557 \cdot 10^{-1} \cdot f + 36,9f^2 + 7,645 \cdot 10^{-4}V_c^2 - 8,537 \cdot 10^{-4}f \cdot V_c^2 - 3,34310^{-1} \cdot f^2 - 276,6f^3 - 1,043 \cdot 10^{-6}V_c^3$	0.6515	3.116	6.512e-05	Significatif

4.6 CONCLUSION

En analysant les données recueillies, on constate que le modèle régressif cubique s'ajuste bien aux données expérimentales. Les modèles cubiques pour les données de fraisage en opposition (up milling) à 0° et de fraisage en avalant (down milling) à 90° des échantillons non traités à la NaOH sont particulièrement performants, avec des coefficients de corrélation de 0,84 et 0,85. Cette observation est également valable pour les échantillons traités à la NaOH.

Pour les autres modes d'usinage et orientations, bien que les coefficients de corrélation soient légèrement inférieurs, les modèles restent valides, soutenus par le fait que la statistique de Fisher observée dépasse celle théorique pour un seuil de signification de 5%.

Il est important de noter que la vitesse d'avance émerge comme le facteur prédominant, ayant un impact significatif sur les forces de coupe normales et axiales. En revanche, l'influence de la vitesse de coupe semble presque insignifiante.

D'autre part, l'effet de l'avance sur la force d'avance est moins prononcé que celui de la vitesse de coupe. Il est à souligner que la corrélation entre la vitesse de coupe et l'avance présente la signification statistique la plus élevée.

CHAPITRE 5

**Modélisation de la rugosité de surface des biocomposites
Epoxy/ Alfa à l'aide d'une architecture de réseau de neurones
Optimisée avec des algorithmes génétiques**

5.1 INTRODUCTION

Au cours des dernières années, de nombreuses recherches ont été menées pour examiner l'influence des paramètres de coupe sur l'usinabilité des composites à fibres naturelles. Ces recherches ont fait usage de l'analyse de régression et de l'intelligence artificielle afin de réduire le nombre d'expériences nécessaires, de sélectionner les paramètres de coupe optimaux, et d'établir des modèles prédictifs avec une précision acceptable. Toutefois, il convient de souligner que le volume de ces études demeure encore limité par rapport à celles portant sur l'usinage des composites renforcés de fibres synthétiques.

L'objectif de cette étude est d'analyser la rugosité de surface résultant du détournage de biocomposites à base d'époxy renforcé par des fibres d'Alfa. Dans un premier temps, une analyse de la variance a été réalisée pour examiner l'effet de la vitesse de coupe, de la vitesse d'avance, de l'orientation des fibres et du traitement chimique des fibres sur la rugosité de surface du biocomposite époxy/Alfa. Cette analyse a été basée sur un plan d'expérience comprenant 100 essais.

Ensuite, dans le but de prédire la rugosité de surface, une architecture hybride ANN-GA basée sur des réseaux de neurones (ANN) optimisée par des algorithmes génétiques (GA) a été développée en utilisant les résultats expérimentaux obtenus. Les performances prédictives de cette architecture ont été comparées à celles des architectures utilisées dans l'algorithme Levenberg-Marquardt backpropagation.

5.2 CONCEPTION DE L'EXPÉRIENCE

Dans ce chapitre, les expériences sont élaborées selon un plan factoriel complet ($5^2 \times 2^2$) comprenant 100 essais expérimentaux avec quatre facteurs d'entrée, à savoir la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f), le sens d'usinage par rapport à l'orientation des fibres (O), et le traitement des fibres (Tr). L'étude porte sur l'usinabilité des composites à fibres traitées (T) et non traitées (UT). Les paramètres d'entrée sélectionnés, ainsi que leurs niveaux, sont répertoriés dans le tableau (5.1).

Tableau 5.1. Niveaux des différents paramètres de coupe.

Niveaux	Vc (m/min)	f (mm/tr)	Tr	O (°)
1	50	0.05	NT	0°
2	100	0.15	T	90°
3	150	0.25	-	-
4	200	0.4	-	-
5	225	0.5	-	-

À la fin du processus d'usinage, la rugosité de surface des profils usinés dans différentes conditions a été mesurée à l'aide d'un rugosimètre modèle PCE_RT1200. Les étapes expérimentales sont récapitulées dans la figure (5.1).

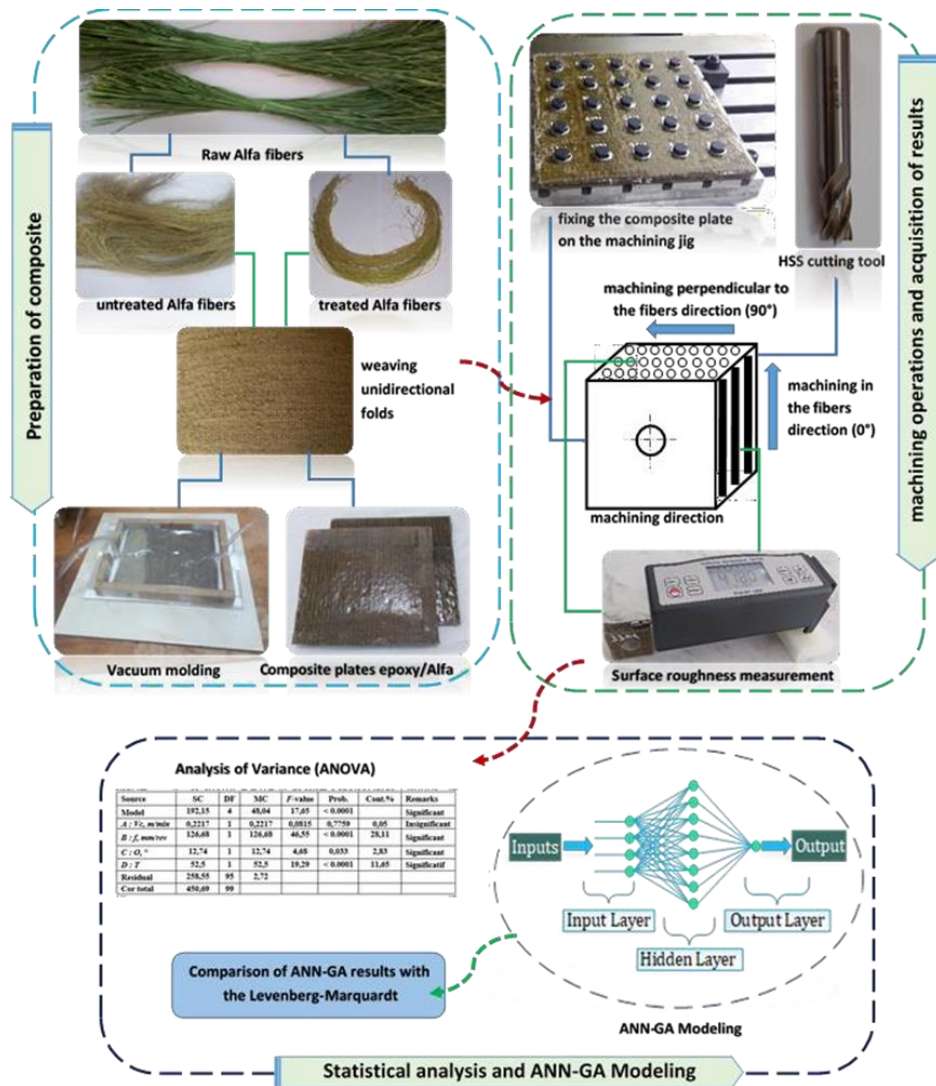


Figure 5.1. Configuration expérimentale.

5.3 ANALYSE DES RÉSULTATS

Le tableau 5.2 présente les conditions de coupe (V_c , f , Tr et O), et les résultats expérimentaux correspondants à la rugosité de surface Ra des 100 profils usinés suivant le plan factoriel complet. Les mesures de Ra sont illustrées dans le tableau (5.2), sont comprises entre $1.6 \mu\text{m}$ et $11.83 \mu\text{m}$.

Tableau 5.2. Résultats Ra selon les conditions de coupe.

Input factors (coded values)					Output factors	Input factor (coded values)					Output factors
N°	V_c (m/min)	f (mm/rev)	O (°)	Tr	Ra (μm)	N°	V_c (m/min)	f (mm/rev)	O (°)	Tr	Ra (μm)
1	50	0.05	0	UT	4.06	51	50	0.05	90	T	2.9
2	100	0.05	0	UT	3.96	52	100	0.05	90	T	10.3
3	150	0.05	0	UT	2.66	53	150	0.05	90	T	4.96
4	200	0.05	0	UT	5.36	54	200	0.05	90	T	6.16
5	225	0.05	0	UT	5.76	55	225	0.05	90	T	4.5
6	50	0.15	0	UT	2.16	56	50	0.15	90	T	2.76
7	100	0.15	0	UT	1.6	57	100	0.15	90	T	6.5
8	150	0.15	0	UT	1.66	58	150	0.15	90	T	5.9
9	200	0.15	0	UT	2.9	59	200	0.15	90	T	4.16
10	225	0.15	0	UT	3.76	60	225	0.15	90	T	5.6
11	50	0.25	0	UT	1.96	61	50	0.25	90	T	2.7
12	100	0.25	0	UT	2.13	62	100	0.25	90	T	2.33
13	150	0.25	0	UT	2.53	63	150	0.25	90	T	2.83
14	200	0.25	0	UT	2	64	200	0.25	90	T	2.66
15	225	0.25	0	UT	3.7	65	225	0.25	90	T	3.4
16	50	0.4	0	UT	2.6	66	50	0.4	90	T	3.23
17	100	0.4	0	UT	2.33	67	100	0.4	90	T	2.6
18	150	0.4	0	UT	2.4	68	150	0.4	90	T	2.23
19	200	0.4	0	UT	2.63	69	200	0.4	90	T	2.86
20	225	0.4	0	UT	1.8	70	225	0.4	90	T	3
21	50	0.5	0	UT	1.96	71	50	0.5	90	T	2.9
22	100	0.5	0	UT	2.8	72	100	0.5	90	T	2.1

Tableau 5.2. Résultats Ra selon les conditions de coupe (suite).

		Input factors (coded values)			Output factors		Input factor (coded values)		Output factors		
N°	V_c (m/min)	f (mm/rev)	O (°)	Tr	Ra (μm)	N°	V_c (m/min)	f (mm/rev)	O (°)	Tr	Ra (μm)
23	150	0.5	0	UT	2.3	73	150	0.5	90	T	3.73
24	200	0.5	0	UT	2.33	74	200	0.5	90	T	2.36
25	225	0.5	0	UT	2.4	75	225	0.5	90	T	2.9
26	50	0.05	90	UT	11.83	76	50	0.05	90	T	9.46
27	100	0.05	90	UT	10.43	77	100	0.05	90	T	7.76
28	150	0.05	90	UT	8.3	78	150	0.05	90	T	4.96
29	200	0.05	90	UT	10.5	79	200	0.05	90	T	4.66
30	225	0.05	90	UT	7.5	80	225	0.05	90	T	7.2
31	50	0.15	90	UT	4.86	81	50	0.15	90	T	5.1
32	100	0.15	90	UT	2.7	82	100	0.15	90	T	6.16
33	150	0.15	90	UT	3	83	150	0.15	90	T	4.96
34	200	0.15	90	UT	4.56	84	200	0.15	90	T	3.2
35	225	0.15	90	UT	4.66	85	225	0.15	90	T	6
36	50	0.25	90	UT	2.86	86	50	0.25	90	T	4.33
37	100	0.25	90	UT	4.86	87	100	0.25	90	T	4.16
38	150	0.25	90	UT	2.7	88	150	0.25	90	T	3.13
39	200	0.25	90	UT	2.13	89	200	0.25	90	T	4.65
40	225	0.25	90	UT	2.33	90	225	0.25	90	T	8.26
41	50	0.4	90	UT	1.86	91	50	0.4	90	T	4.13
42	100	0.4	90	UT	3.13	92	100	0.4	90	T	3.9
43	150	0.4	90	UT	4.66	93	150	0.4	90	T	3.6
44	200	0.4	90	UT	2.43	94	200	0.4	90	T	3.1
45	225	0.4	90	UT	2.83	95	225	0.4	90	T	4.06
46	50	0.5	90	UT	3.53	96	50	0.5	90	T	3.43
47	100	0.5	90	UT	2.76	97	100	0.5	90	T	3.86
48	150	0.5	90	UT	2.6	98	150	0.5	90	T	2.93
49	200	0.5	90	UT	4.3	99	200	0.5	90	T	6.6
50	225	0.5	90	UT	2.63	100	225	0.5	90	T	4.23

5.3.1 Analyse de la variance (ANOVA)

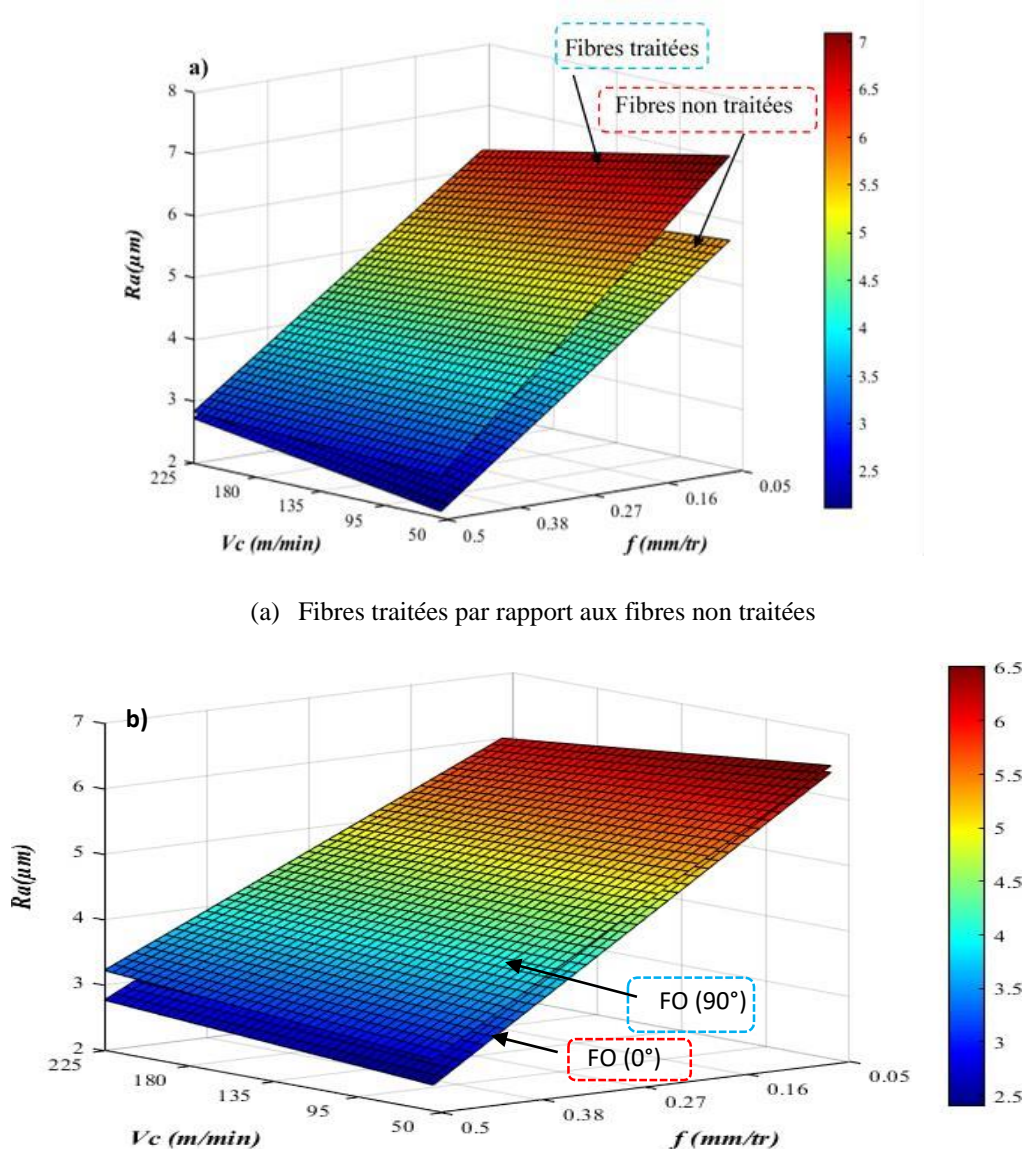
L'analyse de la variance (ANOVA) est une méthode statistique qui examine la relation entre une ou plusieurs variables d'entrée et une variable cible, et permet également de classer ces variables d'entrée en fonction de leur impact sur la variable de sortie [138]. Les résultats de l'ANOVA pour la rugosité Ra sont présentés dans le tableau (5.3). Cette analyse est effectuée avec un niveau de signification α fixé à 0,05, ce qui correspond à un niveau de confiance de 95%. Une probabilité faible ($\leq 0,05$) ou un niveau de confiance de 95% indique la validité statistique des modèles obtenus, ce qui est souhaitable.

Tableau 5.3. ANOVA du modèle pour les valeurs variables explicatives Ra.

Source	SC	DF	MC	F-value	Prob.	Cont.%	conclusion
Model	192.15	4	48.04	17.65	< 0.0001		Significatif
<i>A : Vc, m/min</i>	0.2217	1	0.2217	0.0815	0.7759	0.05	
<i>B : f, mm/rev</i>	126.68	1	126.68	46.55	< 0.0001	28.11	
<i>C : O, °</i>	12.74	1	12.74	4.68	0.033	2.83	
<i>D : T</i>	52.5	1	52.5	19.29	< 0.0001	11.65	
Residual	258.55	95	2.72				
Cor total	450.69	99					

En analysant attentivement les valeurs Ra dans le tableau 5.2 et en examinant les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) présentés dans le tableau 5.3, nous pouvons classer les paramètres de coupe (V_c et f), l'orientation des fibres, ainsi que le traitement des fibres en fonction de leur impact sur la rugosité de la surface. Il est important de noter que la vitesse d'avance par tour (f) se distingue comme le facteur prédominant, contribuant à hauteur de 28,11 % à l'altération de la rugosité de la surface, et son influence augmente notablement à mesure qu'elle croît. Par ailleurs, le traitement des fibres s'avère significatif avec une contribution de 11,65 % à l'effet observé. Quant à l'orientation des fibres, elle exerce une influence perceptible de 2,83 %. En revanche, il est à noter que la vitesse de coupe n'a pas de répercussions significatives sur la rugosité de la surface.

Les figures (5.2 a) et (5.2b) illustrent les surfaces de réponse tridimensionnelles (3D) qui exposent la relation entre Ra et la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, le traitement et l'orientation des fibres.



(a) Fibres traitées par rapport aux fibres non traitées

b) Orientation des fibres à 90° par rapport à l'orientation des fibres à 0° .

Figure 5.2. Surfaces de réponse en 3D pour Ra .

Ces surfaces confirment les résultats de l'analyse ANOVA de Ra . Il est clair que la vitesse d'avance présente la pente la plus prononcée, renforçant ainsi son influence significative sur le Ra . L'examen de ces surfaces révèle qu'une réduction substantielle de Ra est associée à une augmentation de la vitesse d'avancement. En revanche, la vitesse de coupe présente une pente presque négligeable, indiquant son impact limité sur la rugosité de la surface.

5.3.2 Modélisation ANN-GA

5.3.2.1 Modélisation ANN

Les réseaux de neurones artificiels (ANN) sont l'une des techniques d'intelligence artificielle qui s'inspirent du fonctionnement du cerveau humain et permettent d'accomplir des tâches précieuses pour des applications industrielles lors de la modélisation, la classification et les activités d'approximation [16]. Les ANN, sont composés de trois types de couches : la première couche, également appelée couche d'entrée, la dernière couche, nommée couche de sortie, et éventuellement d'autres couches, désignées comme couches cachées (Figure 5.4). Pour un réseau de neurones avec $L + 1$ couches. Les quantités suivantes sont définies

$$Z_j^l = \sum_k w_{jk} a_k^{l-1} + b_j^l, \quad \forall l = 1, \dots, L - 1, L + 1$$

$$a_j^l = f\left(\sum_k w_{jk} a_k^{l-1} + b_j^l\right) = f(Z_j^l), \quad \forall l = 1, \dots, L - 1, L + 1$$

Où $a_j^0 = x_j$ (x_j est la $j^{\text{ième}}$ donnée d'entrée), w_{jk}^l la valeur du poids du $k^{\text{ième}}$ neurone dans la $(L - 1)^{\text{ième}}$ couche au $j^{\text{ième}}$ neurone dans la $l^{\text{ième}}$ couche, b_i^j sont les biais et f est la fonction d'activation.

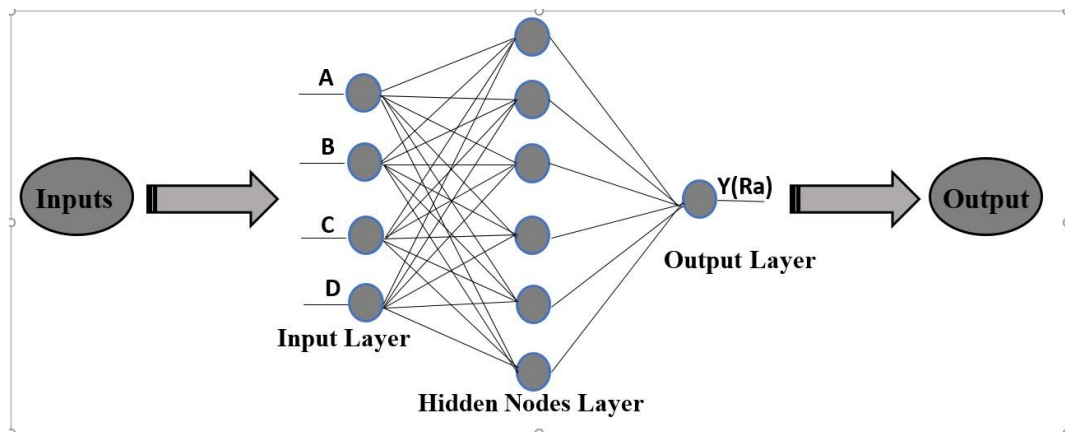


Figure 5.3. Représentation graphique d'un ANN.

Le défi de l'apprentissage se formule comme la minimisation d'une fonction d'évaluation évaluant les performances d'un réseau neuronal sur un ensemble de données. Cette fonction dépend des paramètres adaptables tels que les biais et les poids du réseau neuronal.

Le problème d'apprentissage pour les réseaux neuronaux consiste à rechercher un vecteur de paramètres w_i et b_i pour lequel la fonction d'évaluation f atteint une valeur minimale.

La condition nécessaire stipule que si le réseau neuronal est à un minimum de la fonction d'évaluation.

Divers algorithmes sont utilisés pour entraîner un réseau de neurones, offrant ainsi une flexibilité et une diversité dans les approches d'apprentissage. Dans cette étude, plusieurs types d'algorithmes d'optimisation ont été employés pour obtenir une architecture optimale d'un réseau de neurones :

- Gradient descente (GD)

L'algorithme gradient descente est la méthode d'apprentissage la plus simple [139, 140], qui utilise les informations du vecteur de gradient, ce qui en fait une méthode de premier ordre.

Le processus d'apprentissage débute à partir d'un point $w^{(0)}$ et, jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint, il se déplace de $w^{(0)}$ à $w^{(i+1)}$ dans la direction d'entraînement $d^{(i)} = -g^{(i)}$. Ainsi, l'algorithme de gradient descente procède les itérations de la façon suivante :

$$w^{(i+1)} = w^{(i)} - g^i \eta^i$$

Le paramètre η est le taux d'apprentissage. Le gradient descente est l'algorithme privilégié pour les réseaux neuronaux massifs qui contiennent de nombreux paramètres dû au fait que cette méthode n'a besoin de stocker que le vecteur de gradient, de taille n .

- Méthode de Newton (NM)

La méthode de Newton est classée comme un algorithme de deuxième ordre car elle se base sur l'utilisation de la matrice Hessienne. Son objectif est d'identifier des directions d'entraînement plus efficaces en exploitant les dérivées secondes de la fonction d'évaluation. Les itérations de la méthode de Newton sont comme suivies :

$$w^{i+1} = w^i - (H^{i-1} \cdot g^i) \eta \quad \text{avec } i = 0, 1, \dots$$

Le vecteur H^{i-1} et g^i est pas de Newton dont $(H^{i-1} \cdot g^i)$ est la direction d'apprentissage de Newton.

- Gradient Conjugué (CG)

La méthode du gradient conjugué se situe quelque part entre la descente de gradient et la méthode de Newton [141]. Dans l'algorithme d'entraînement par gradient conjugué, la recherche s'effectue le long de directions conjuguées, ce qui permet généralement une convergence plus rapide par rapport aux directions de descente de gradient. Ces directions d'entraînement sont conjuguées en relation avec la matrice Hessienne.

La méthode du gradient conjugué crée une séquence de directions d'entraînement de manière successive de la forme :

$$w^{i+1} = w^i + d^i \cdot \eta^i$$

Avec

$$d^{i+1} = g^{i+1} + d^i \cdot \gamma^i$$

γ est appelé le paramètre conjugué. Le gradient conjugué s'est avéré plus efficace que la descente de gradient pour l'entraînement des réseaux neuronaux. Cette méthode offre de bonnes performances même avec des réseaux neuronaux de grande taille, car elle ne nécessite pas l'utilisation de la matrice Hessienne.

- Méthode Quasi-Newton (QNM)

Une approche alternative, connue sous le nom de méthode Quasi-Newton, a été développée pour remédier la limitation de la méthode Newton sur le plan de coût des calculs. Cette méthode évite le calcul direct du Hessien et de son inverse. Au lieu de cela, elles construisent une approximation de l'inverse du Hessien.

La méthode quasi-Newton repose sur l'approximation de l'inverse du hessien, qui est une matrice composée des dérivées partielles d'ordre deux de la fonction d'évaluation. Cependant, au lieu d'utiliser directement ces dérivées, elle utilise uniquement les dérivées partielles d'ordre un de la fonction d'évaluation pour construire une matrice G qui approxime l'inverse du Hessien. Ainsi, la formule de la méthode quasi-Newton s'exprime de la manière suivante :

$$w^{i+1} = w^i - (G^i \cdot g^i) \eta^i \quad \text{avec } i = 0, 1, \dots$$

- Algorithme de Levenberg-Marquardt (LM)

L'algorithme de Levenberg-Marquardt [142] est adapté aux fonctions d'évaluation qui sont exprimées sous la forme d'une somme d'erreurs au carré. Contrairement à l'utilisation de la matrice Hessienne exacte, cet algorithme se base sur le vecteur gradient et la matrice jacobienne pour effectuer les calculs nécessaires.

L'expression suivante définit le processus d'amélioration des poids w^{i+1} avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt :

$$w^{i+1} = w^i - (J^{iT} \cdot J^i + \lambda^i I)^{-1} \cdot (2J^{iT} \cdot e^i) \quad \text{pour } i = 0, 1, \dots$$

Avec
$$J_{i,j} = \frac{\partial e^i}{\partial w_j} \text{ pour } i = 1, \dots, m ; j = 1, \dots, n$$

$J_{i,j}$ est la matrice Jacobienne de la fonction d'évaluation est composée des dérivées des erreurs par rapport aux paramètres du réseau neuronal dont n représente le nombre de ces paramètres.

e^i est erreurs au carré et m représente le nombre d'échantillons d'entraînement.

Comme mentionné précédemment, l'algorithme de Levenberg-Marquardt est spécifiquement conçu pour les fonctions de type somme des erreurs au carré. Cette caractéristique lui confère une grande rapidité lors de l'entraînement des réseaux neuronaux évalués à l'aide de ce type d'erreurs.

- Régularisation bayésienne (BR)

Les méthodes basées sur l'approche bayésienne sont généralement considérées comme les plus performantes pour l'entraînement des réseaux neuronaux [143, 144]. Dans cette approche, le processus d'entraînement des réseaux de neurones artificiels est abordé de manière probabiliste, ce qui permet de quantifier de manière rigoureuse l'incertitude associée. La fonction objectif G régularisée est formulée de la manière suivante :

$$G = \beta MSE_D + \alpha MSE_w$$

MSE_D et MSE_w sont la somme des erreurs au carré de la base de données et des poids du réseau, respectivement. β et α sont des hyperparamètres appelés paramètres de régularisation.

L'objectif principal est d'obtenir la distribution a posteriori des paramètres appropriés en utilisant l'inférence bayésienne. Cette méthode repose sur la construction d'une distribution a priori, qui ne dépend pas des connaissances préalables sur les poids ajustables. Ensuite, une probabilité de vraisemblance est construite pour évaluer la probabilité de générer les paramètres appropriés et permettre ainsi l'évaluation du modèle. Le théorème de Bayes peut-être utiliser pour estimer la distribution de probabilité a posteriori $P(w|D; \beta, \alpha, A)$ des poids de la manière suivante :

$$P(w|D; \beta, \alpha, A) = \frac{P(D|w; \beta, A)P(w|\alpha; A)}{P(D|w; \beta, A)}$$

A est le réseau de neurones artificiels avec m paramètres.

5.3.2.2 Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (GA), sont des méthodes computationnelles inspirées par la théorie

de l'évolution, visent à résoudre des défis complexes en employant des principes de sélection naturelle et de génétique, notamment les croisements, les mutations et la sélection [145]. Un algorithme génétique a pour but de déterminer un ou plusieurs optima d'une fonction établie dans un espace de données. Pour être mis en œuvre, il nécessite d'être paramétré avec les cinq composantes fondamentales suivantes:

1. Un processus de codification des éléments de la population, qui implique d'attribuer une structure de données à chaque point de l'espace d'état, intervient typiquement après une phase de modélisation mathématique du problème en question.
2. Un mécanisme pour créer la population de départ, capable de générer un ensemble initial d'individus hétérogènes qui constituera le point de départ pour les générations futures.
3. Une fonction d'évaluation des individus, qui renvoie des valeurs dans l'ensemble des nombres réels positifs (\mathbb{R}^+), est appelée la fonction de fitness. Elle est utilisée pour sélectionner les meilleurs individus de la population en vue de leur reproduction.
4. Des processus visant à diversifier la population à chaque génération et à explorer l'ensemble des possibilités. Le processus de croisement mélange les gènes des individus existants, alors que la mutation vise à étendre l'exploration de l'espace d'état.
5. Les paramètres de configuration incluent la dimension de la population, le nombre total de générations ou le critère de terminaison, et également les probabilités associées à l'utilisation des opérateurs de croisement et de mutation.

5.3.2.3 Optimisation d'un réseau de neurones «ANN» par les algorithmes génétiques

Dans le cadre de l'optimisation des réseaux de neurones, les algorithmes génétiques sont employés pour déterminer les hyperparamètres optimaux tels que la dimension du réseau, l'algorithme d'apprentissage, le taux d'apprentissage, les fonctions d'activation [145], entre autres. Diverses études ont démontré que l'utilisation des algorithmes génétiques pour optimiser les réseaux de neurones peut aboutir à des performances sensiblement supérieures par rapport aux approches traditionnelles d'optimisation telle que la descente de gradient stochastique (SGD) [146]. Cette approche a permis d'identifier des architectures de réseaux de neurones qui ont considérablement amélioré les performances en régression, comme illustré dans ce travail spécifique. Cependant, il convient de noter que l'utilisation d'algorithmes génétiques peut entraîner des coûts élevés en termes de temps de calcul et de ressources, en particulier lorsqu'ils sont appliqués à des réseaux de neurones de grande taille.

5.3.3 Présentation de l'algorithme d'optimisation d'un réseau de neurones

Dans cette étude, les algorithmes génétiques ont été utilisés pour optimiser l'architecture du réseau de neurones pour un problème de régression, le principe de l'algorithme est résumé dans les étapes suivantes :

1. Définir les hyperparamètres du réseau de neurones à optimiser, qui comprend le nombre de couches, le nombre de neurones dans chaque couche, la fonction d'activation pour chaque couche, l'algorithme d'apprentissage et le nombre d'itérations d'apprentissage.
2. Définir un critère d'évaluation qui mesure la qualité des prédictions du réseau de neurones en comparant les prédictions du réseau de neurones avec les valeurs réelles de la variable cible, dans ce cas les critères d'évaluation sont (R^2 : Coefficient de corrélation, RMSE : Erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error), MAD : écart moyen absolu (Mean Absolute Deviation), MAPE : erreur moyenne absolue en pourcentage (Mean Absolute Percentage Error) et MAE : Erreur moyenne absolue (Mean Absolute Error). Les formules de différents critères d'erreurs sont présentées dans le tableau 5.4.
3. Définir une population initiale de solutions aléatoires, qui représentent différentes configurations de l'architecture du réseau de neurones et des hyperparamètres.
4. Appliquer les opérateurs génétiques (sélection, croisement et mutation) pour créer une nouvelle génération de solutions en utilisant la population actuelle.
5. Évaluer chaque solution de la nouvelle génération en utilisant la fonction d'évaluation et

sélectionner les solutions optimales pour la génération suivante.

6. Répéter les étapes 4 et 5 jusqu'à la découverte d'une solution optimale ou jusqu'à l'atteinte d'un critère d'arrêt préalablement défini.

Une fois que l'algorithme génétique a convergé vers une solution optimale, les hyperparamètres et l'architecture optimale du réseau de neurones peuvent être utilisés pour prédire les valeurs de la variable cible sur des données de test (Rugosité de surface Ra). La méthode utilisée pour optimiser l'architecture de réseau de neurones est synthétisée dans un organigramme récapitulatif qui est représenté par la figure (5.4). Cette illustration résume les différentes étapes de l'approche d'optimisation mise en place, permettant ainsi de visualiser de manière synthétique l'ensemble du processus.

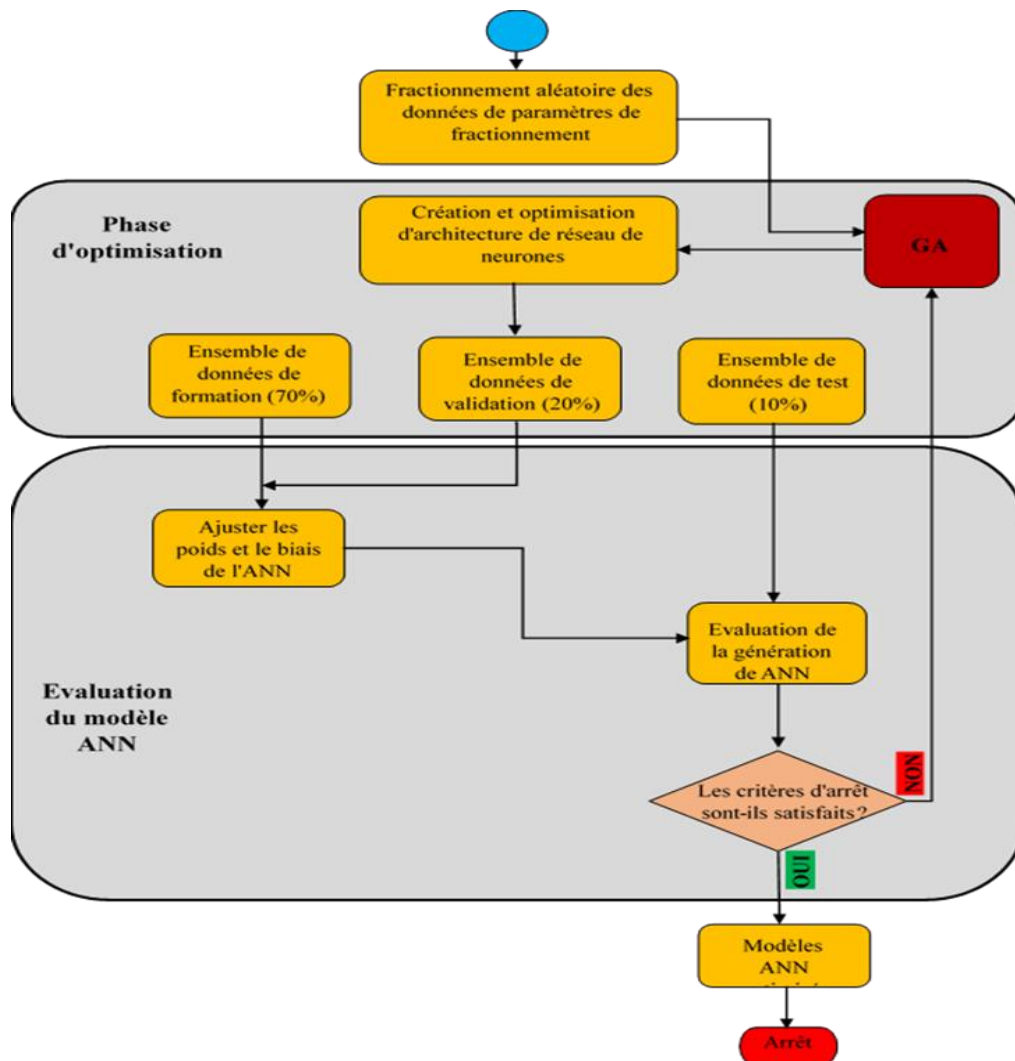


Figure 5.4. Organigramme d'optimisation de l'architecture ANN par GA.

Les formules qui permettent de calculer les erreurs et le coefficient de corrélation sont présentées dans le tableau 5.4.

Tableau 5.4. Fonctions d'erreur et ses équations

Fonction d'erreur	Formule
Erreur absolue moyenne	$MAD = \sum_{t=1}^n \frac{ E_t - P_t }{n} \quad (1)$
Erreur absolue moyenne en pourcentage (%)	$MAPE = \sum_{t=1}^n \frac{ (E_t - P_t)/E_t }{n} \times 100 \quad (2)$
Erreur quadratique moyenne	$RMSE = \sum_{t=1}^n \sqrt{\frac{(E_t - P_t)^2}{n}} \quad (3)$
Coefficient de corrélation	$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (P_t - E_t)}{\sum_{t=1}^n (P_t - Y_e)^2} \quad (4)$
<i>n</i> : le nombre d'expérience, <i>E_t</i> : la valeur expérimentale de la <i>i^{ème}</i> expérience, <i>P_t</i> : la valeur prédite de la <i>i^{ème}</i> expérience, <i>Y_e</i> : la réponse moyenne observée dans les expériences.	

5.3.3.1 Paramètres d'optimisation :

L'architecture d'un réseau de neurones artificiels détermine la façon dont les neurones sont organisés en couches et comment ils sont connectés. Les paramètres qui ont été optimisés dans cette étude sont la taille du réseau, l'algorithme d'apprentissage et les fonctions d'activation pour chaque couche. Lors de la création d'un réseau de neurones, la dimension du réseau représente un paramètre essentiel à prendre en compte. Elle détermine le nombre de couches et le nombre de nœuds dans chaque couche. L'algorithme d'apprentissage est un mécanisme visant à modifier les poids et les biais du réseau afin de réduire l'erreur de prédiction. Les fonctions d'activation régissent la sortie d'un neurone en dépendance de ses entrées. Dans cette étude, la taille du réseau, l'algorithme d'apprentissage et la fonction d'activation ont été optimisées en utilisant l'algorithme génétique pour trouver la combinaison optimale de couches et de nœuds pour maximiser les performances du réseau.

Le nombre de couches, le nombre de nœuds, les algorithmes d'apprentissage et les fonctions d'activation utilisés dans cette étude sont montrés sur le tableau 5.5.

Tableau 5.5. Paramètres d'optimisation ANN.

couche cachés	Nœuds de couche cachés	Algorithmes d'apprentissage	Fonctions d'activation
Min :1 Max :10	Min :1 Max :10	Trainbr : Bayesian Regulation backpropagation	Elliotssig : Elliot sigmoid transfer function
		Trainbfg : BFGS quasi-Newton backpropagation	Hardlim : Positive hard limit transfer function
		Traincgb : Conjugate gradient backpropagation with Powell-Beale restarts	Hardlims : Symmetric hard limit transfer function
		Traincgf : Conjugate gradient backpropagation with Fletcher-Reeves updates	Logsig : Logarithmic sigmoid transfer function
		Traincgp : Conjugate gradient backpropagation with Polak-Ribiere updates	Netinv : Inverse transfer function
		Traingd : Gradient descent backpropagation	Poslin : Positive linear transfer function
		Trainгда : Gradient descent with adaptive lr backpropagation	Purelin : Linear transfer function
		Traingdm : Gradient descent with momentum	Radbas : Radial basis transfer function
		Traingdx : Gradient descent w/momentum & adaptive lr backpropagation	Radbasn : Radial basis normalized transfer function
		Trainoss : One step secant backpropagation	Satlin : Positive saturating linear transfer function
		Trainrp : RPROP backpropagation	Satlin : Symmetric saturating linear transfer function
		Trainscg : Scaled conjugate gradient backpropagation	Softmax : Soft max transfer function
	Tansig : Symmetric sigmoid transfer function		
	Tribas : Triangular basis transfer function		

5.4 RESULTATS DES PREDICTIONS ANN-GA

Le tableau 5.6 expose les résultats prédits de Ra obtenus grâce à l'architecture ANN-GA développée. Les valeurs des différents indices de performance (IP) tels que R^2 , RSME, MAD, MAPE et MAE du modèle ANN optimisé par GA pour la rugosité de surface Ra au cours des cinq (5) meilleures itérations sont présentées dans le tableau 5.7 et la figure 5.6 (Spider-plot).

Tableau 5.6. Résultats de Ra prédit par ANN.

N°	Ra <i>Exp.</i> (μm)	Ra <i>ANN</i> (μm)	N°	Ra <i>Exp.</i> (μm)	Ra <i>ANN</i> (μm)	N°	Ra <i>Exp.</i> (μm)	Ra <i>ANN</i> (μm)	N°	Ra <i>Exp.</i> (μm)	Ra <i>ANN</i> (μm)
1	4.06	4.06	26	11.83	11.84	51	2.9	2.30	76	9.46	9.45
2	3.96	3.94	27	10.43	9.37	52	10.3	10.31	77	7.76	7.76
3	2.66	2.66	28	8.3	9.58	53	4.96	6.41	78	4.96	6.41
4	5.36	6.94	29	10.5	10.29	54	6.16	5.25	79	4.66	5.61
5	5.76	5.76	30	7.5	10.75	55	4.5	4.50	80	7.2	6.76
6	2.16	2.25	31	4.86	4.86	56	2.76	3.35	81	5.1	5.69
7	1.6	1.71	32	2.7	4.27	57	6.5	6.50	82	6.16	6.95
8	1.66	1.77	33	3	2.95	58	5.9	4.18	83	4.96	4.85
9	2.9	3.05	34	4.56	3.97	59	4.16	4.56	84	3.2	3.20
10	3.76	3.75	35	4.66	5.61	60	5.6	4.84	85	6	6.55
11	1.96	1.74	36	2.86	2.60	61	2.7	2.06	86	4.33	4.47
12	2.13	1.51	37	4.86	3.98	62	2.33	2.83	87	4.16	4.26
13	2.53	2.53	38	2.7	2.67	63	2.83	3.23	88	3.13	4.05
14	2	2.20	39	2.13	1.47	64	2.66	3.28	89	4.65	4.65
15	3.7	3.25	40	2.33	2.36	65	3.4	3.39	90	8.26	6.54
16	2.6	2.20	41	1.86	2.45	66	3.23	3.23	91	4.13	3.84
17	2.33	2.14	42	3.13	3.83	67	2.6	2.70	92	3.9	3.88
18	2.4	2.06	43	4.66	3.83	68	2.23	3.00	93	3.6	3.07
19	2.63	2.63	44	2.43	3.21	69	2.86	2.73	94	3.1	3.10
20	1.8	1.80	45	2.83	3.29	70	3	2.51	95	4.06	4.97
21	1.96	2.57	46	3.53	2.98	71	2.9	2.30	96	3.43	3.46
22	2.8	2.54	47	2.76	3.48	72	2.1	2.87	97	3.86	4.07
23	2.3	2.30	48	2.6	2.41	73	3.73	3.08	98	2.93	3.85
24	2.33	2.51	49	4.3	4.31	74	2.36	2.77	99	6.6	6.59
25	2.4	2.64	50	2.63	2.52	75	2.9	2.44	100	4.23	4.10

Tableau 5.7. Erreurs de prédiction ANN.

		Optimal	5 meilleurs Itérations				
			1	2	3	4	5
R²	Training	0.9679	0.9352	0.9473	0.9718	0.9165	0.9679
	Validation	0.9750	0.8881	0.9419	0.9441	0.9875	0.9750
	Test	0.9750	0.8881	0.9419	0.9441	0.9875	0.9750
	Global	0.9529	0.8989	0.9473	0.9254	0.8752	0.9529
RMSE	Training	0.5325	0.7168	0.7042	0.4932	0.8088	0.5325
	Validation	1.3749	2.0400	0.4013	2.0992	2.8299	1.3749
	Test	1.3749	2.0400	0.4013	2.0992	2.8299	1.3749
	Global	0.6665	0.8670	0.6800	0.8122	1.1788	0.6665
MAD	Training	0.9427	0.4489	0.9333	0.9444	0.8818	0.9427
	Validation	1.4577	0.4489	1.1337	0.2566	1.8167	1.4577
	Test	1.4577	0.8126	1.1337	0.2566	1.8167	1.4577
	Global	1.009	0.1523	0.9380	0.8713	0.9692	1.0090]
MAPE (%)	Training	10.52	19.51	15.33	10.71	16.27	10.52
	Validation	23.71	19.51	10	24.74	31.64	23.71
	Test	23.71	19.51	10	24.74	31.64	23.71
	Global	11.84	15.66	14.80	12.11	17.80	11.84
MAE	Training	0.3633	0.4825	0.5210	0.3152	0.5990	0.3633
	Validation	1.0696	1.1693	0.3319]	1.3155	1.5084	1.0696
	Test	1.0696	1.1693	0.3319]	1.3155	1.5084	1.0696
	Global	0.4339	0.5512	0.5021	0.4152	0.6900	0.4339

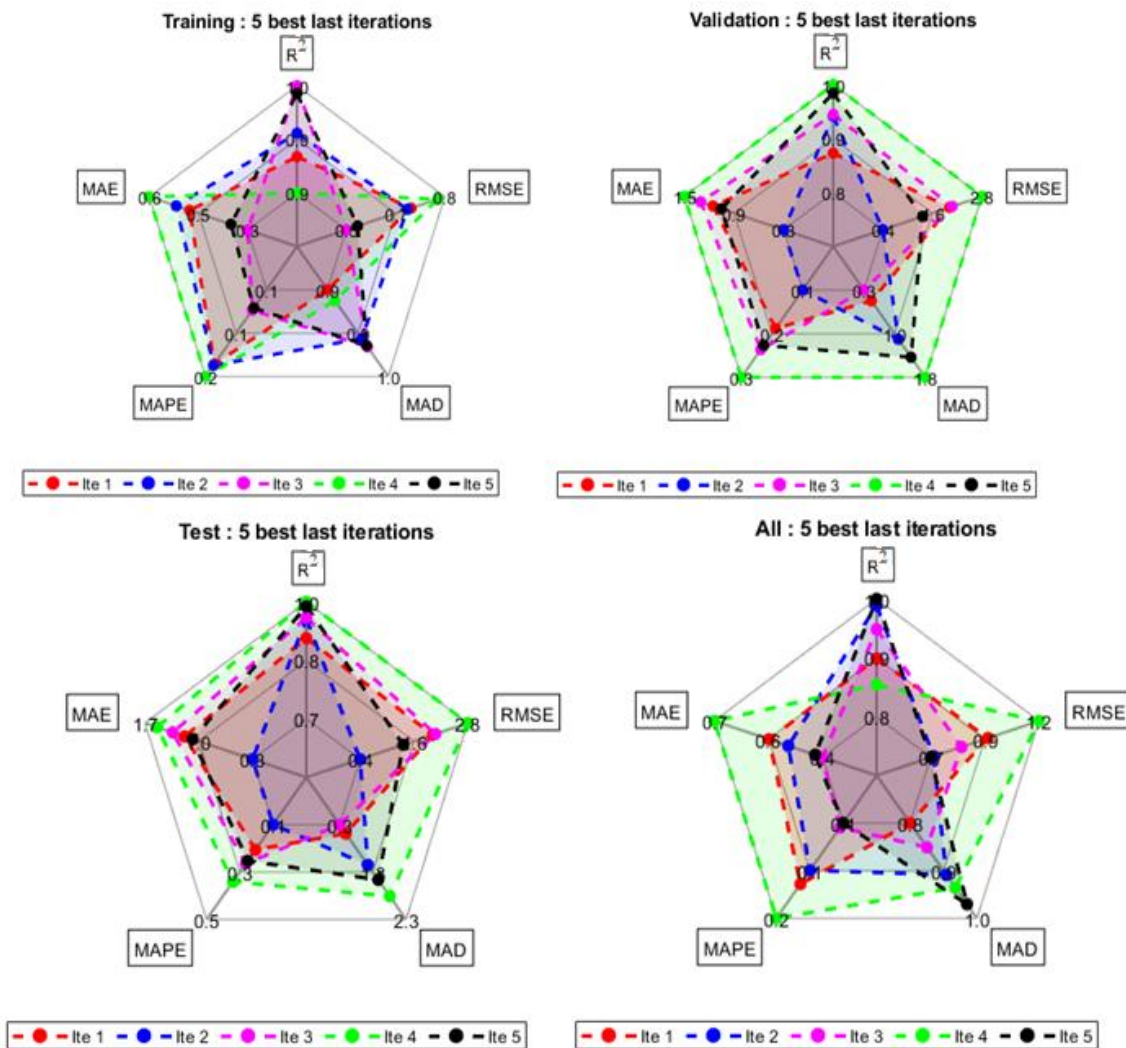


Figure 5.5 Diagramme en forme d'araignée des indices de performance pour les cinq meilleures itérations.

Les résultats démontrent des indices de performance (IP) globalement élevés, en particulier pour la dernière itération, où des valeurs très élevées sont observées pour l'apprentissage, la validation et le test. Les IP (R^2 , RSME, MAD, MAPE et MAE) pour l'apprentissage sont respectivement de 0.9679, 0.5325, 0.9427, 10.52 % et 0.3633, indiquant que le réseau de neurones généré peut prédire la rugosité avec une grande précision sur les données d'apprentissage. Pour la validation et le test, les valeurs de IP sont de 0.975, 1.3749, 1.4577, 23.71 % et 1.0696, confirmant la capacité du réseau de neurones à généraliser sur des données inconnues et à prédire avec précision la Ra sur de nouvelles données. Enfin, les valeurs globales de IP sont également élevées (0.9529, 0.665, 1.009, 11.84 % et 0.4339), suggérant que le réseau de neurones peut prédire de manière précise la rugosité de surface Ra dans l'ensemble des données. La comparaison entre les valeurs expérimentales

(mesurées) de Ra et celles estimées par ANN-GA est présentée graphiquement sur la figure (5.6).

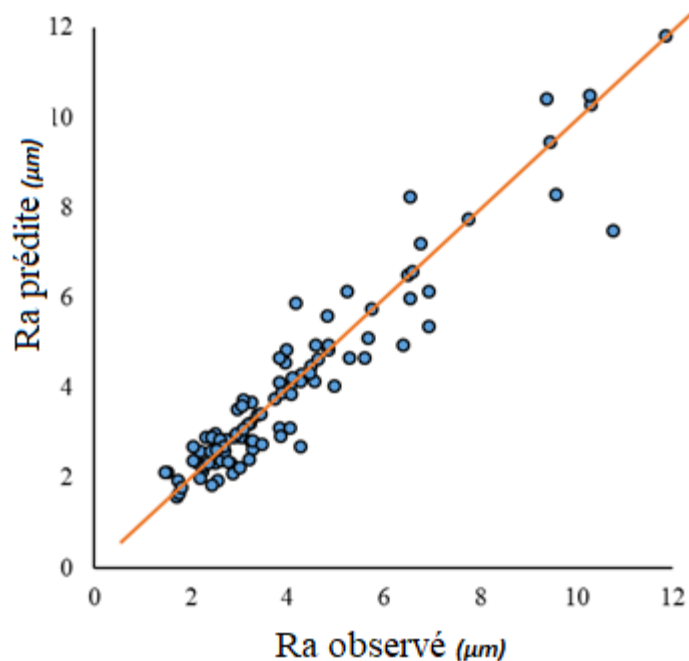


Figure 5.6. Corrélation entre les valeurs expérimentales et estimées par ANN-GA.

L'analyse de cette illustration révèle une corrélation très satisfaisante entre les données expérimentales et les prédictions fournies par le modèle ANN-GA, démontrant ainsi la capacité exceptionnelle du modèle à saisir la relation entre les variables d'entrée et de sortie.

Ces résultats confirment que l'emploi d'un algorithme génétique pour l'optimisation des hyperparamètres et de la structure du réseau de neurones a conduit à des performances exceptionnelles dans la prédiction de la rugosité de surface. Il est essentiel de noter que la qualité des résultats est également tributaire de la qualité des données utilisées pour l'entraînement et la validation du réseau de neurones.

Le tableau 5.8 présente les architectures d'ANN optimales pour les 5 meilleures itérations, sélectionnées en fonction de leurs performances selon les IP définis.

Tableau 5.8. Architecture ANN-GA optimale pour les cinq meilleures itérations.

Itération	Numéro de couche	Taille de la couche	Algorithme d'apprentissage	Fct- Act
1	3	6	trainbr	tansig
		7		radbasn
		4		netinv
2	3	6	tansig	tansig
		7		radbasn
		3		netinv
3	3	6	trainbr	tansig
		7		radbasn
		3		netinv
4	3	6	trainlm	tansig
		7		radbasn
		3		netinv
5	3	6	trainbr	tansig
		7		radbasn
		3		netinv

Les résultats présentés permettent d'identifier le nombre de couches cachées, nombre de nœuds dans chaque couches, l'algorithme d'apprentissage et la fonction d'activation qui ont été utilisées pour construire les architectures de réseaux de neurones ayant les meilleures performances. La configuration optimale de l'architecture (itération 5) est la suivante (nombre de couche cachées :3, nombre de nœuds pour chaque couche : 6,7 et 3 respectivement, la fonction d'apprentissage est **trainbr** et les fonctions d'activation pour chaque couche sont **tansig**, **radbasn** et **netinv** respectivement).

5.5 COMPARAISON ENTRE LES ALGORITHMES ANN-GA ET LM

Dans cette section, l'architecture de réseau de neurones trouvée par les algorithmes génétiques a été comparé aux architectures utilisées dans l'algorithme Levenberg-Marquardt backpropagation (LM) qu'est particulièrement efficace pour résoudre des problèmes non linéaires lors de l'entraînement de réseaux de neurones à rétropropagation du gradient. Il est capable de trouver des minimas locaux de la fonction d'erreur et peut converger plus rapidement que d'autres méthodes

d'optimisation classiques. Cela peut fournir des informations sur les performances prédictives d'architectures ANN-GA obtenus dans ce travail.

Les données exposées dans le tableau (5.9) et les spider plot de la figure (5.7) montrent les performances des modèles de réseaux neuronaux de LM et ANN-GA.

Tableau 5.9. Comparaison entre ANN-GA et LM.

IP global	AG OPT	LM (trainlm)
R^2	0.9529	0.8648
RMSE	0.6665	1.0707
MAD	1.009	0.9135
MAPE (%)	11.84	21.18
MAE	0.4339	

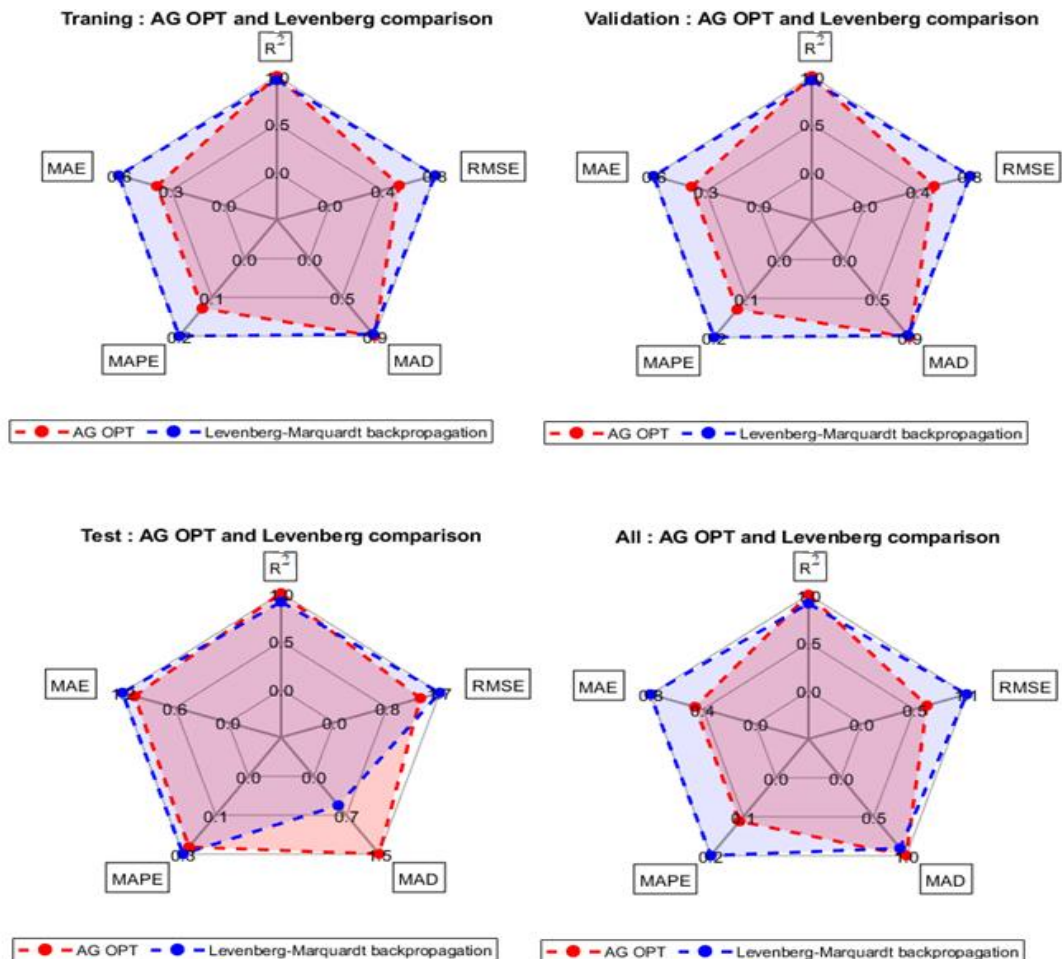


Figure 5.7. Corrélation entre les valeurs expérimentales et estimées par ANN-GA et LM.

Les données démontrent que les ANN-GA surpassent LM en termes de valeurs d'IP.

Globalement, ces observations mettent en évidence le potentiel d'utiliser un algorithme génétique pour optimiser la structure d'un réseau de neurones, offrant ainsi une approche efficace pour améliorer les capacités de prédiction des modèles de réseaux de neurones.

5.6 CONCLUSION

L'étude statistique et de modélisation de la rugosité de surface des profils usinés lors de détournage de bio composite époxy/Alfa à l'aide de l'ANOVA et ANN-GA en se basent sur les résultats de plan d'expérience de 100 essais réalisées dans ce travail permet de dégager les principales conclusions suivantes :

L'ANOVA montre que l'avance par tour affecte la rugosité de surface de bio composite époxy/Alfa d'une manière considérable avec un taux de 28.11 %, suivie par l'effet de traitement chimique sur les fibres avec une contribution de 11.65 %, et enfin l'orientation des fibres avec une faible influence de 2.83 %.

L'architecture ANN-GA élaborée dans cette étude démontre une capacité de prédiction remarquable, soulignant une corrélation étroite entre les valeurs de Ra prédites et mesurées. Les enregistrements des valeurs de R^2 , RSME, MAD, MAPE et MAE sont respectivement de 0.9529, 0.665, 1.009, 11.84 % et 0.4339.

Les résultats de comparaison entre l'architecture d'ANN optimisée par GA et par l'algorithme Levenberg-Marquardt back propagation montre l'efficacité de GA pour améliorer les performances prédictive d'ANN.

L'hybridation à base de la technique des plans des expériences et les méthodes d'intelligence artificielle est très utile pour analyser les phénomènes de la rugosité de surface et pour la prédiction des nouveaux résultats avec une grande précision.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE

Cette recherche a débuté par la fabrication d'un matériau composite constitué de fibres naturelles, précisément des fibres d'Alfa, intégrées à une matrice époxy. Par la suite, nous avons procédé à l'usinage de ce matériau, mettant particulièrement l'accent sur le détourage pour évaluer son usinabilité. Une attention approfondie a été portée aux paramètres de coupe impactant la rugosité des surfaces usinées, ainsi qu'aux éventuels dommages résultant du processus d'usinage. Le détourage du matériau composite (Epoxy/Alfa) a été réalisé à l'aide d'un outil de coupe ARS à quatre.

Divers modes d'usinage, à savoir en opposition (up milling) et en avalant (down milling), ont été appliqués à des échantillons du composite élaboré, présentant différentes orientations des fibres d'Alfa.

Au terme de ce travail, nous avons constaté que le mode de fraisage en avalant n'est pas recommandé pour le détourage du matériau composite époxy/Alfa. Il se traduit par les résultats les moins satisfaisants en ce qui concerne la rugosité de la surface et les dommages de surface. De plus, les dommages les plus significatifs ont été observés lors de l'usinage des échantillons avec une orientation des fibres à 90 degrés, quelle que soit la méthode d'usinage utilisée. Cela met en évidence l'impact de l'orientation des fibres sur la qualité de la surface usinée.

L'examen des dommages superficiels par microscopie électronique à balayage (MEB) révèle la présence de problèmes d'ébouriffage sur les bords de la surface. Ces problèmes d'ébouriffage sont particulièrement marqués sur les échantillons usinés en mode de fraisage avalant, surtout pour les coupons à orientation de 90°. L'image MEB indique que la surface usinée présente des fibres saillantes, des fibres non coupées, et des fissures dans la matrice. Le peluchage émerge comme le défaut majeur observé lors du détourage des composites époxy/Alfa.

L'étude du comportement à l'usinage du matériau composite (Epoxy/Alfa) fait ressortir les principales conclusions suivantes :

- La rugosité de surface évolue de manière similaire avec l'avance pour les deux modes de détourage (fraisage opposition et fraisage avalant). La valeur Ra diminue avec des vitesses d'avance (f) plus élevées, indiquant une qualité de surface améliorée ;
- Les pires rugosités de surface sont généralement obtenues à faible vitesse d'avance (f), quelle que soit la vitesse de coupe (Vc).

Conclusion générale

- Lorsque les composites de fibres Alfa sont rainurés à une faible vitesse d'avance (f) et une vitesse de coupe élevée (V_c), on peut observer l'émission de fumée.
- L'effet de la vitesse d'avance (f) s'est avéré négligeable lors du détournage parallèle aux fibres (orientation des fibres à 0°) en mode opposition (up milling) ;

Afin d'explorer l'influence des paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe (V_c) et la vitesse d'avance (f), ainsi que l'orientation des fibres d'Alfa, les modes d'usinage (en opposition et en avalant), et le traitement des fibres d'Alfa avec ou sans NaOH sur la rugosité (Ra) des surfaces usinées, une analyse de régression a été entreprise. À la suite de cette analyse, des modèles de régression ont été formulés et validés pour établir des relations entre ces variables explicatives et la variable à expliquer (Ra), dans le but de faciliter la prédiction de la rugosité.

L'analyse statistique et la modélisation de la rugosité de surface des profils usinés lors du détournage du biocomposite époxy/Alfa, effectuées à l'aide de l'ANOVA et de l'ANN-GA, se fondent sur les résultats d'un plan d'expérience composé de 100 essais réalisés dans le cadre de cette étude. Les conclusions principales qui émergent de cette analyse sont les suivantes : L'analyse de variance (ANOVA) indique que l'avance par tour exerce une influence significative sur la rugosité de surface du biocomposite époxy/Alfa, contribuant à hauteur de 28,11 %. Ensuite, l'effet du traitement chimique des fibres présente une contribution de 11,65 %, suivi par l'orientation des fibres qui a une influence relativement faible de 2,83 %.

L'architecture ANN-GA élaborée au cours de cette étude démontre une remarquable aptitude à prédire, mettant en évidence une étroite corrélation entre les valeurs de Ra prédites et mesurées. Les enregistrements pour R^2 , RSME, MAD, MAPE et MAE sont respectivement de 0.9529, 0.665, 1.009, 11.84 % et 0.4339.

Les résultats de la comparaison entre l'architecture d'un réseau de neurones artificiels (ANN) optimisé par l'algorithme génétique (GA) et celui optimisé par l'algorithme de Levenberg-Marquardt backpropagation révèlent de manière significative l'efficacité de l'approche basée sur GA pour augmenter les performances prédictives de l'ANN. Cette constatation met en évidence le potentiel avantageux de l'optimisation génétique dans le contexte de l'amélioration des capacités de prédiction du réseau de neurones artificiels, soulignant ainsi la pertinence de l'utilisation de GA dans ce cadre d'étude.

Conclusion générale

En perspectives de ce travail, il serait intéressant d'aborder les différents points cités ci-après :

1. Dans le contexte de l'usinage à grande vitesse, il est nécessaire d'explorer l'impact de la géométrie des outils de coupe sur les imperfections de l'usinage, les forces de coupe et les températures d'usinage
2. Analyse de l'impact de la stratification des couches, en particulier de l'orientation des fibres dans chaque couche, sur les caractéristiques mécaniques du bio-composite.
3. La modélisation numérique de l'usinage en coupe orthogonale d'un composite Alfa /époxy à l'aide de la méthode des éléments finis.
4. L'exploration approfondie du comportement à l'usinage du matériau composite hybride (Alfa, luffa) /époxy se poursuit. Cette étude analyse en détail l'impact de divers paramètres de coupe sur la rugosité des surfaces usinées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Joshi, S.V., et al., *Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber-reinforced composites?* Composites Part A: Applied science and manufacturing, 2004. **35**(3): p. 371-376.
2. El-Sayed, A., et al., *Friction and wear properties of polymeric composite materials for bearing applications.* Wear, 1995. **184**(1): p. 45-53.
3. Yousif, B., S.T. Lau, and S. McWilliam, *Polyester composite based on betelnut fibre for tribological applications.* Tribology international, 2010. **43**(1-2): p. 503-511.
4. Lotfi, A., H. Li, and D.V. Dao, *Machinability analysis in drilling flax fiber-reinforced polylactic acid bio-composite laminates.* International Journal of Materials and Metallurgical Engineering, 2019. **13**(9): p. 443-447.
5. Fontes, R.S., et al., *Failure theories and notch type effects on the mechanical properties of jute-glass hybrid composite laminates.* Materials Research, 2019. **22**.
6. Dittenber, D.B. and H.V. GangaRao, *Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure.* Composites Part A: applied science and manufacturing, 2012. **43**(8): p. 1419-1429.
7. Shah, D.U., *Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: a critical review.* Journal of materials science, 2013. **48**(18): p. 6083-6107.
8. Shalwan, A. and B. Yousif, *In state of art: mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres.* Materials & Design, 2013. **48**: p. 14-24.
9. John, M.J., K. Varughese, and S. Thomas, *Green composites from natural fibers and natural rubber: Effect of fiber ratio on mechanical and swelling characteristics.* Journal of Natural fibers, 2008. **5**(1): p. 47-60.
10. Rosa, M.F., et al., *Effect of fiber treatments on tensile and thermal properties of starch/ethylene vinyl alcohol copolymers/coir biocomposites.* Bioresource technology, 2009. **100**(21): p. 5196-5202.
11. Chin C. and B. Yousif, *Potential of kenaf fibres as reinforcement for tribological applications.* Wear, 2009. **267**(9-10): p. 1550-1557.
12. Haque, M.M., et al., *Physico-mechanical properties of chemically treated palm and coir fiber reinforced polypropylene composites.* Bioresource technology, 2009. **100**(20): p. 4903-4906.
13. Yousif, B., U. Nirmal, and K. Wong, *Three-body abrasion on wear and frictional performance of treated betelnut fibre reinforced epoxy (T-BFRE) composite.* Materials & Design, 2010. **31**(9): p. 4514-4521.
14. Benyahia, A., et al., *Study of the alkali treatment effect on the mechanical behavior of the composite unsaturated polyester-Alfa fibers.* Mechanics & Industry, 2014. **15**(1): p. 69-73.
15. Rokbi, M. and H. Osmani. *L'effet des traitements de surface des fibres sur les propriétés mécaniques de composites Polyester-fibres Alfa.* In *CFM 2011-20ème Congrès Français de Mécanique. 2011. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc- 92400 Courbevoie.*

Références bibliographiques

16. El-Abbassi, F.E., et al., *Effect of alkali treatment on Alfa fibre as reinforcement for polypropylene based eco-composites: Mechanical behaviour and water ageing*. Composite Structures, 2015. **133**: p. 451-457.
17. Amroune, Salah, et al. "Tensile mechanical properties and surface chemical sensitivity of technical fibres from date palm fruit branches (*Phoenix dactylifera* L.)." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 71 (2015): 95-106.
18. Amroune, Salah, et al. "Investigation of the date palm fiber for green composites reinforcement: thermo-physical and mechanical properties of the fiber." *Journal of Natural Fibers* 18.5 (2021): 717-734.
19. Bledzki, A. and J. Gassan, *Composites reinforced with cellulose based fibres*. Progress in polymer science, 1999. **24**(2): p. 221-274.
20. Wang, D., M. Ramulu, and D. Arola, *Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995. **35**(12): p. 1623-1638.
21. Wang, D., M. Ramulu, and D. Arola, *Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II: multi-directional laminate*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995. **35**(12): p. 1639-1648.
22. John, K. and S.T. Kumaran, *Backup support technique towards damage-free drilling of composite materials: A review*. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2020. **3**(4): p. 357-364.
23. Sheikh-Ahmad, J., N. Urban, and H. Cheraghi, *Machining damage in edge trimming of CFRP*. Materials and Manufacturing Processes, 2012. **27**(7): p. 802-808.
24. Chegdani, F., et al., *Fiber type effect on tribological behavior when cutting natural fiber reinforced plastics*. Wear, 2015. **332**: p. 772-779.
25. 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*. Measurement, 2021. **184**: p. 109921.
26. Berthelot, J., *Matériaux Composites: Comportement Mécanique et Analyse des structures, 5ème Lavoisier*. 2012, Paris.
27. Teti, R., *Machining of composite materials*. CIRP Annals, 2002. **51**(2): p. 611-634.
28. Gornet, L., *Généralités sur les matériaux composites*. 2008.
29. Karabibene, N., *Optimisation des paramètres de détourage des composites à fibres de lin et comparaison avec le détourage des composites à fibres de verre*. 2017, École de technologie supérieure.
30. Yan, L., N. Chouw, and K. Jayaraman, *Flax fibre and its composites—A review*. Composites Part B: Engineering, 2014. **56**: p. 296-317.
31. Belkhir, S., et al., *Variations in the morphological characteristics of *Stipa tenacissima* fiber: the case of Tunisia*. Industrial Crops and Products, 2012. **37**(1): p. 200-206.

Références bibliographiques

32. Feughelman, M., *Mechanical properties of wool fibres & the two-phase model. Mechanical Properties and structure of alpha-keratin fibers: Wool Human Hair and Related Fibers*. 1997, Svdnev: USNW Press.
33. Colomban, P., *Fibres animales: structure multi-échelles & propriétés mécaniques*. *ULTRAMICROSCOPY*, 2010. **110**: p. 1192-1197 Laboratoire de Dynamique, Interactions & Réactivité (LADIR umr 7075 CNRS)
34. Dallel, M., *Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.): Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil*. 2012, Université de Haute Alsace-Mulhouse.
35. Placet, V., et al. *Suivi par DRX des réarrangements microstructuraux induits par sollicitations mécaniques dans les fibres végétales tirées du chanvre*. in *CFM 2011- 20ème Congrès Français de Mécanique*. 2011. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
36. Baley, C., *Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2002. **33**(7): p. 939-948.
37. 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.
38. Dirand, X., et al., *Interfacial shear strength in glass-fiber/vinylester-resin composites*. *Composites science and technology*, 1996. **56**(5): p. 533-539.
39. Ochi, S., *Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites*. *Mechanics of materials*, 2008. **40**(4-5): p. 446-452.
40. Mishra, S., J. Naik, and Y. Patil, *The compatibilising effect of maleic anhydride on swelling and mechanical properties of plant-fiber-reinforced novolac composites*. *Composites Science and Technology*, 2000. **60**(9): p. 1729-1735.
41. Gassan, J. and A.K. Bledzki, *The influence of fiber-surface treatment on the mechanical properties of jute-polypropylene composites*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997. **28**(12): p. 1001-1005.
42. Gassan, J. and A.K. Bledzki, *Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxy composites by alkali treatment of fibres*. *Composites Science and Technology*, 1999. **59**(9): p. 1303-1309.
43. Bouafif, H., *Effets des caractéristiques intrinsèques des fibres de bois et des procédés de mise en forme sur la performance des matériaux composites bois/thermoplastique*. 2009, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue; Université du Québec à Montréal.
44. Poilâne, C., et al., *Propriétés mécaniques de préimprégnés lin/époxyde*. *Compte rendu des JNC16*, Toulouse, 2009.
45. Bogoeva- Gaceva, G., et al., *Natural fiber eco - composites*. *Polymer composites*, 2007. **28**(1): p. 98-107.
46. 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.
47. 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.

Références bibliographiques

48. Mabrouk, A.B., et al., *Cellulosic nanoparticles from alfa fibers (Stipa tenacissima): extraction procedures and reinforcement potential in polymer nanocomposites*. Cellulose, 2012. **19**: p. 843-853.
49. Bouiri, B. and M. Amrani, *Production of dissolving grade pulp from alfa*. BioResources, 2010. **5**(1).
50. Nadji, H., et al., *Chemical composition and pulp properties of Alfa (Stipa tenacissima)*. Cellulose chemistry and technology, 2006. **40**(1/2): p. 45.
51. Omar, A. and M.B. Khadra, *Esparto grass (Stipa tenacissima L.), raw material of papermaking. First part*. ХИМИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ, 2007(4): p. 25-30.
52. Marrakchi, Z., et al., *Pulping and papermaking properties of Tunisian Alfa stems (Stipa tenacissima)—effects of refining process*. Industrial Crops and Products, 2011. **34**(3): p. 1572-1582.
53. Brahim, S.B. and R.B. Cheikh, *Influence of fibre orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite*. Composites Science and Technology, 2007. **67**(1): p. 140-147.
54. Helaili, S. and M. Chafra, *Anisotropic visco-elastic properties identification of a natural biodegradable ALFA fiber composite*. Journal of composite materials, 2014. **48**(13): p. 1645-1658.
55. Ghali, L., M. Zidi, and S. Roudesli, *Physical and mechanical characterization of technical esparto (alfa) fibres*. Journal of applied sciences, 2006. **6**(11): p. 2450-2455.
56. Hanana, S., et al., *An efficient enzymatic-based process for the extraction of high- mechanical properties alfa fibres*. Industrial Crops and Products, 2015. **70**: p. 190-200.
57. Bessadok, A., et al., *Influence of chemical modifications on water-sorption and mechanical properties of Agave fibres*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008. **39**(1): p. 29-45.
58. Bessadok, A., et al., *Alfa fibres for unsaturated polyester composites reinforcement: Effects of chemical treatments on mechanical and permeation properties*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009. **40**(2): p. 184-195.
59. Rokbi, M., et al., *Effect of chemical treatment on flexure properties of natural fiber- reinforced polyester composite*. Procedia Engineering, 2011. **10**: p. 2092-2097.
60. Bessadok, A., et al., *Effect of chemical treatments of Alfa (Stipa tenacissima) fibres on water-sorption properties*. Composites science and technology, 2007. **67**(3-4): p. 685- 697.
61. Arrakhiz, F., et al., *Mechanical and thermal properties of polypropylene reinforced with Alfa fiber under different chemical treatment*. Materials & Design, 2012. **35**: p. 318- 322.
62. Mechakra, H., et al., *Mechanical characterizations of composite material with short Alfa fibers reinforcement*. Composite Structures, 2015. **124**: p. 152-162.
63. Borchani, K.E., C. Carrot, and M. Jaziri, *Biocomposites of Alfa fibers dispersed in the Mater-Bi® type bioplastic: Morphology, mechanical and thermal properties*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015. **78**: p. 371-379.
64. Berges, M., et al. *Microstructure et vieillissement hygrothermique de composites renforcés de fibres de lin unidirectionnelles*. in *Journées Nationales sur les Composites 2017*. 2017.
65. Arrakhiz, F., et al., *Tensile, flexural and torsional properties of chemically treated alfa, coir*

Références bibliographiques

- and bagasse reinforced polypropylene*. Composites Part B: Engineering, 2013. **47**: p. 35-41.
66. Haddad, M., *Étude de l'impact des défauts d'usinage des structures composites par détournage sur leur comportement mécanique*. 2013, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
67. Ozkan, D., M.S. Gok, and A.C. Karaoglanli, *Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability*. Engineering Design Applications III: Structures, Materials and Processes, 2020: p. 235-253.
68. Chegdani, F., *Analyse multiéchelle de l'usinage des matériaux biosourcés: Application aux agrocomposites*. 2016, Paris, ENSAM.
69. Ramulu, M., *Machining and surface integrity of fibre-reinforced plastic composites*. Sadhana, 1997. **22**: p. 449-472.
70. 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.
71. Collaine, A., C. Jordan, and M. Turlonias. *Etude de l'influence des paramètres d'usinage sur des opérations de détournage de composites à renfort fibres de verre*. in *CFM 2017-23ème Congrès Français de Mécanique*. 2017. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
72. Turki, Y., et al. *Etude expérimentale du détournage d'un composite carbone/époxy*. in *7ème colloque national de la recherche dans les IUT*. 2011.
73. Turki, Y., et al. *Evaluation expérimentale du comportement d'un composite carbone/époxy en usinage*. in *CFM 2011-20ème Congrès Français de Mécanique*. 2011. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
74. Santo, L., G. Caprino, and I. De Iorio. *Cutting forces and cut quality in orthogonal cutting of unidirectional carbon fibre reinforced plastics*. in *III Biennial World Conf. on Integr. Design & Process Technol., Berlin, July 6-9*. 1998.
75. Turki, Y., et al., *Experimental investigation of drilling damage and stitching effects on the mechanical behavior of carbon/epoxy composites*. International journal of machine tools and manufacture, 2014. **87**: p. 61-72.
76. Slamani, M., J.-F. Chatelain, and H. Hamedanianpour, *Influence of machining parameters on surface quality during high speed edge trimming of carbon fiber reinforced polymers*. International Journal of Material Forming, 2019. **12**: p. 331-353.
77. Bérubé, S., *Usinage en détournage de laminés composites carbone/époxy*. 2012, École de technologie supérieure.
78. Mullier, G. and J.F. Chatelain, *Influence of thermal damage on the mechanical strength of trimmed CFRP*. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, 2015. **9**(8): p. 1559-1566.
79. Delahaigue, J., J.-F. Chatelain, and G. Lebrun, *Influence of cutting temperature on the tensile strength of a carbon fiber-reinforced polymer*. Fibers, 2017. **5**(4): p. 46.
80. El Ghaoui, K., *Influence de nanoparticules sur l'usinabilité et les propriétés mécaniques des matériaux composites*. 2019, École de technologie supérieure.

Références bibliographiques

81. Hamedanianpour, H. and J.F. Chatelain, *Effect of tool wear on quality of carbon fiber reinforced polymer laminate during edge trimming*. Applied mechanics and materials, 2013. **325**: p. 34-39.
82. Kraus, T. and M. Kühnel, *Composites-Marktbericht 2016*. 2016.
83. Uhlmann, E., et al., *Machining of carbon and glass fibre reinforced composites*. Procedia CIRP, 2016. **46**: p. 63-66.
84. Kavadi, B., et al., *A review paper on effects of drilling on glass fiber reinforced plastic*. Procedia Technology, 2014. **14**: p. 457-464.
85. Parida, A., B. Routara, and R. Bhuyan, *Surface roughness model and parametric optimization in machining of GFRP composite: Taguchi and Response surface methodology approach*. Materials Today: Proceedings, 2015. **2**(4-5): p. 3065-3074.
86. Babu, G.D., K.S. Babu, and B.U.M. Gowd, *Effect of machining parameters on milled natural fiber-reinforced plastic composites*. J. Adv. Mech. Eng, 2013. **1**: p. 1-12.
87. Delahaigue, J., J. Chatelain, and G. Lebrun, *Machining analysis of unidirectional and bi-directional flax-epoxy composite laminates*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2017. **231**(1-2): p. 196-209.
88. Mercy, j., et al., *Genetic optimization of Machining parameter affecting thrust force during drilling of pineapple fiber composite plates-an experimental approach* journal of natural fibers 19.5(2022):1729-1740.
89. Chegiani, F., et al., *Experimental study of coated tools effects in dry cutting of natural fiber reinforced plastics*. Surf coatings technology 284(2015) 264-272.
90. John, R., et al., *Effects of machining parameters on surface quality of composites reinforced with natural fibers*, Mater Manuf processes 36(1) (2021) 73-83, <https://doi.org/10.1080>.
91. Nassar, MM.A., et al., *machinability of natural fiber reinforced composites .a review*, int.J.adv. Manuf. Tecnal.88 (9-12) (2017) 2985-3004.
92. Celik, Y.H., et al., *An experimental study on milling of natural fiber (jute). Reinforced polymer composites*, J.compos.Mater.56 (22) (2019)3127-3137.
93. Chegiani, F., et al., *Thermal effects on tribological behavior in machining natural fiber composites* procedia Manufacturing 26 (2018) 305.316.
94. Slamani, et al., *statistical analysis of surface roughness during high-speed edge trimming of flax- fiber composites based on the split-split plot randomized complete block design* Measurement 184 (2021): 109921.
95. Tabet, Z., et al., *Drilling of a bidirectional jute fiber and cork reinforced polymer biosandwich structure: ANN and RSM approaches for modelling and optimization* the international journal of advanced Manufacturing technology 117.11-12 (2021) 3819-3839.
96. Belaadi, A., et al., *Mechanical characterization and optimization of delamination factor in drilling bidirectional jute fiber reinforced polymer biocomposites* the international journal of advanced Manufacturing technology 111 (2020) 2073-2094.
97. Benyettou, R., et al., *Inverstigation of machinability of biocomposites: modeling and ANN optimization*. Acadimic journal of Manufacturing engineering 21.1 (2023).

Références bibliographiques

98. Mehdadi, Z., et al., *Etude du comportement du méristème végétatif de l'alfa (Stipa tenacissima L.)-Approches cytologique et histologique*. Journal de la Société de Biologie, 2000. **194**(3-4): p. 195-204.
99. Hattalli, S., et al., *Adding value to Alfa grass (Stipa tenacissima L.) soda lignin as phenolic resins I. Lignin characterization*. Polymer Degradation and Stability, 2002. **76**(2): p. 259-264.
100. Paiva, M., et al., *Alfa fibres: Mechanical, morphological and interfacial characterization*. Composites Science and Technology, 2007. **67**(6): p. 1132-1138.
101. Ajouguim, S., et al., *Modifications of Alfa fibers by alkali and hydrothermal treatment*. Cellulose, 2019. **26**: p. 1503-1516.
102. MARTINI, C. and I. Aitken, *Pesons et fusaiöles sur le site grec d'Érétrie*. Antike Kunst, 2015. **58**: p. 61-77.
103. Faruk, O., et al., *Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010*. Progress in polymer science, 2012. **37**(11): p. 1552-1596.
104. Slamani, M., H. Chafai, and J. Chatelain, *Effect of milling parameters on the surface quality of a flax fiber-reinforced polymer composite*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2022: p. 09544089221126087.
105. Cabrera, F.M., et al., *Sur l'usinabilité des composites à matrices polymères renforcée par des fibres*. Mechanics & Industry, 2010. **11**(2): p. 93-103.
106. Benardos, P. and G.-C. Vosniakos, *Predicting surface roughness in machining: a review*. International journal of machine tools and manufacture, 2003. **43**(8): p. 833- 844.
107. Inoue, T. and M. Hagino, *Cutting characteristics of CFRP materials with carbon fiber distribution*. International Journal of Automation Technology, 2013. **7**(3): p. 285-291.
108. Khashaba, U., *In-plane shear properties of cross-ply composite laminates with different off-axis angles*. Composite structures, 2004. **65**(2): p. 167-177.
109. De Albuquerque, V.H.C., J.M.R. Tavares, and L.M. Durão, *Evaluation of delamination damage on composite plates using an artificial neural network for the radiographic image analysis*. Journal of Composite Materials, 2010. **44**(9): p. 1139-1159.
110. Erkan, Ö., et al., *Prediction of damage factor in end milling of glass fibre reinforced plastic composites using artificial neural network*. Applied Composite Materials, 2013. **20**: p. 517-536.
111. Shyha, I., et al., *Hole quality assessment following drilling of metallic-composite stacks*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011. **51**(7-8): p. 569-578.
112. Hosokawa, A., et al., *High-quality machining of CFRP with high helix end mill*. CIRP Annals, 2014. **63**(1): p. 89-92.
113. Sreenivasulu, R., *Optimization of surface roughness and delamination damage of GFRP composite material in end milling using Taguchi design method and artificial neural network*. Procedia Engineering, 2013. **64**: p. 785-794.
114. Janardhan, P., J. Sheikh-Ahmad, and H. Cheraghi, *Edge trimming of CFRP with diamond interlocking tools*. 2006, SAE Technical Paper.
115. Al-Oqla, F.M. and S. Sapuan, *Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry*. Journal of Cleaner Production, 2014. **66**: p. 347-354.

116. Ramli, N., et al. *Natural fiber for green technology in automotive industry: a brief review*. in *IOP conference series: Materials science and engineering*. 2018. IOP Publishing.
117. Fragassa, C., *Marine applications of natural fibre-reinforced composites: A manufacturing case study*. *Advances in Applications of Industrial Biomaterials*, 2017: p. 21-47.
118. dos Santos Silva, G., C. Capela, and M. Gaspar. *Developing Sustainable Materials for Marine Environments: Algae as Natural Fibers on Polymer Composites*. in *Progress in Digital and Physical Manufacturing: Proceedings of ProDPM'19*. 2020. Springer.
119. Koenig, W., et al., *Machining of fibre reinforced plastics*. *CIRP Annals*, 1985. **34**(2): p. 537-548.
120. Bustin, S.A., et al., *The need for transparency and good practices in the qPCR literature*. *Nature methods*, 2013. **10**(11): p. 1063-1067.
121. El-Hofy, M., et al., *Factors affecting workpiece surface integrity in slotting of CFRP*. *Procedia Engineering*, 2011. **19**: p. 94-99.
122. Chai, M., et al., *Influence of natural fibre reinforcements on the flammability of bio- derived composite materials*. *Composites Part B: Engineering*, 2012. **43**(7): p. 2867- 2874.
123. Jahanmir, S., M. Ramulu, and P. Koshy, *Machining of ceramics and composites*. (No Title), 1999.
124. Slamani, M., et al., *Edge trimming of flax fibers and glass fibers reinforced polymers composite—An experimental comparative evaluation*. *International Journal of Material Forming*, 2021. **14**: p. 1497-1510.
125. Chegiani, F., S. Mezghani, and M. El Mansori, *Experimental study of coated tools effects in dry cutting of natural fiber reinforced plastics*. *Surface and Coatings Technology*, 2015. **284**: p. 264-272.
126. Morkavuk, S., et al., *Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties: A comparative study*. *Composites Part B: Engineering*, 2018. **147**: p. 1-11.
127. Madenci, E., Y.O. Özkılıç, and L. Gemi, *Experimental and theoretical investigation on flexure performance of pultruded GFRP composite beams with damage analyses*. *Composite Structures*, 2020. **242**: p. 112162.
128. Montoya, M., et al., *Evaluation of the performance of coated and uncoated carbide tools in drilling thick CFRP/aluminium alloy stacks*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013. **68**: p. 2111-2120.
129. Shyha, I., et al., *Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites*. *Journal of materials processing technology*, 2010. **210**(8): p. 1023-1034.
130. Wang, C., et al., *Occurrence and formation mechanism of surface cavity defects during orthogonal milling of CFRP laminates*. *Composites Part B: Engineering*, 2017. **109**: p. 10-22.
131. Coutellier, C.D., *Le développement de la fibre de chanvre dans l'industrie automobile*. Université catholique de Louvain, 2016.

Références bibliographiques

132. Rutot, D. and P. Dubois, *Les (bio) polymères biodégradables: l'enjeu de demain?* CHIMIE NOUVELLE., 2004(86): p. 66-74.
133. Rahmane, A. and T. Benmansour, *Étude du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs*. 2018, Université Frères Mentouri-Constantine 1.
134. Badji, C., *Vieillessement de matériaux composites renforcés de fibres naturelles: étude de l'impact sur les propriétés d'aspect et sur les émissions dans l'air intérieur*. 2017, Université de Pau et des pays de l'Adour.
135. Soria Fernández, A., *Développement d'un biocomposite avec fibres naturelles pour l'emballage de yaourts*. 2020, Universitat Politècnica de Catalunya.
136. Ducroux, E., *Analyse et développement d'un modèle d'effort généralisé pour le fraisage haute performance de l'Inconel 718 issu de fabrication additive*. 2020, HESAM Université.
137. Slamani, M., S. Gauthier, and J.-F. Chatelain, *Comparison of surface roughness quality obtained by high speed CNC trimming and high speed robotic trimming for CFRP laminate*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016. **42**: p. 63-72.
138. Nouioua, M., et al., *Evaluation of: MOSSA, MOALO, MOVO and MOGWO algorithms in green machining to enhance the turning performances of X210Cr12 steel*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022. **120**(3-4): p. 2135- 2150.
139. Muoi, P.Q., et al., *Descent gradient methods for nonsmooth minimization problems in ill-posed problems*. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2016. **298**: p. 105-122.
140. Singh, B.K., K. Verma, and A. Thoke, *Adaptive gradient descent backpropagation for classification of breast tumors in ultrasound imaging*. Procedia Computer Science, 2015. **46**: p. 1601-1609.
141. Møller, M.F., *A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning*. Neural networks, 1993. **6**(4): p. 525-533.
142. Moré, J.J. *The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory*. in *Numerical analysis: proceedings of the biennial Conference held at Dundee, June 28– July 1, 1977*. 2006. Springer.
143. Sun, Z., et al., *A Bayesian regularized artificial neural network for adaptive optics forecasting*. Optics Communications, 2017. **382**: p. 519-527.
144. Heydecker, B.G. and J. Wu, *Identification of sites for road accident remedial work by Bayesian statistical methods: an example of uncertain inference*. Advances in Engineering Software, 2001. **32**(10-11): p. 859-869.
145. Laouissi, A., et al., *Heat treatment process study and ANN-GA based multi-response optimization of C45 steel mechanical properties*. Metals and Materials International, 2022. **28**(12): p. 3087-3105.
146. Manzagol, P.-A., *TONGA: un algorithme de gradient naturel pour les problèmes de grande taille*. 2008.