

Effet des additifs de graphène et de cire sur la qualité du perçage de matériaux composites de type GFRP

Par

Siwar JAMMEL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 17 JANVIER, 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Siwar Jammel, 2024



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE RAPPORT DE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jean-François Chatelain, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Mohamed Slamani, codirecteur de mémoire
Département de génie Mécanique, Faculté de Technologie, Université de M'sila

M. Roland Maranzana, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Lucas Hof, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

UN MÉMOIRE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 11 DECEMBRE 2024

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur et mon codirecteur de recherche, M. Jean-François Chatelain et M. Mohamed Slamani, pour m'avoir guidé durant tout le cheminement de ma maîtrise. Merci de la confiance que vous avez portée à mon égard, de votre disponibilité et votre expertise grâce auxquelles j'ai pu mener à bien ce projet de recherche. Je suis sincèrement reconnaissante pour votre soutien moral et financier et pour les opportunités que vous m'avez offertes en me confiant un sujet aussi passionnant que celui-ci.

Je remercie également le responsable du laboratoire LIFE et les techniciens de laboratoire, messieurs X. Rimpault, J. Grignon, N. Mazeghrane et C.D. Legault. Cette étude n'aurait pas été réalisable sans leur aide, leur disponibilité et leurs précieux conseils.

Merci à tous mes camarades et collègues à l'ÉTS pour avoir créé une aussi bonne ambiance de travail et d'avoir été à mon écoute en proposant un œil nouveau face à mes difficultés.

Je souhaite exprimer ma gratitude la plus sincère à ma famille, qui occupe une place centrale dans ma vie et sans qui ce mémoire n'aurait pas vu le jour. À mes parents, pour leur amour incommensurable, leur patience infinie, et leur soutien indéfectible qui m'ont guidée à chaque étape de ce parcours. À mes frères et sœurs, pour leur affection, leurs encouragements constants, et leur présence chaleureuse, qui ont été une source inépuisable de réconfort et de motivation. Vous êtes mon pilier, ma force, et ma plus grande source d'inspiration. Ce mémoire est dédié à vous, avec tout mon amour.

Merci de m'avoir toujours poussé à étudier dans cet incroyable ascenseur social qu'est l'école. Longue vie à vous.

Effet des additifs graphène et de cire sur la qualité du perçage de matériaux composites de type GFRP

Siwar JAMMEL

RÉSUMÉ

Les polymères renforcés de fibres (Fiber Reinforced Plastics, FRP) sont de plus en plus utilisés dans l'industrie en raison de leurs propriétés mécaniques spécifiques qui permettent de concevoir des structures légères par rapport aux matériaux traditionnels comme les métaux. Bien que de nombreux procédés de fabrication soient disponibles pour ces matériaux, des opérations d'usinage restent nécessaires pour obtenir les pièces finales.

Cependant, l'usinage des composites présente des défis particuliers. Ce mémoire explore la possibilité d'améliorer le processus de perçage en ajoutant des additifs dans la matrice époxy des composites. Dans cette étude, des composites renforcés de fibre de verre (GFRP) ont été fabriqués en intégrant deux types d'additifs : la cire et le graphène. Neuf plaques différentes ont été usinées avec un outil revêtu de diamant CVD cristallin véritable.

Le choix du graphène et de la cire repose sur leurs propriétés intrinsèques et leur pertinence pour les besoins industriels. Le graphène, avec ses propriétés thermiques et lubrifiantes remarquables, offre une réduction potentielle des efforts et des températures de coupe, tandis que la cire, économique et facile à incorporer, agit comme un lubrifiant efficace pour limiter l'usure des outils. Le perçage, en tant qu'opération d'usinage largement utilisée dans des secteurs tels que l'aéronautique et l'automobile, représente un défi clé où les gains en qualité et en durabilité des outils peuvent avoir un impact significatif. Cette approche novatrice vise à combler les lacunes de la littérature sur l'usinabilité des composites modifiés.

Pour évaluer l'usinabilité, les efforts de coupe ont été mesurés à l'aide d'une table dynamométrique, et les températures de coupe ont été enregistrées à l'aide d'une caméra thermique. La qualité de surface des trous a été analysée à partir des mesures de rugosité.

Les résultats montrent que certaines combinaisons d'additifs, notamment 2 % de cire sans ajout de graphène, ont permis une amélioration modérée de l'usinabilité. L'ajout de 0,25 % de

VIII

graphène et de 1 % de cire a également permis de réduire légèrement les températures, les efforts de coupe et la rugosité. Bien que les améliorations observées soient limitées, elles suggèrent que l'ajout d'additifs dans les FRP peut être une stratégie prometteuse pour optimiser l'usinabilité et réduire les coûts de fabrication, notamment en minimisant les dommages et en augmentant la durée de vie des outils.

Mots clés : GFRP, Perçage, Propriétés mécaniques, Cire, Graphène, CVD

Effet des additifs graphène et de cire sur la qualité du perçage de matériaux composites de type GFRP

Siwar JAMMEL

ABSTRACT

Fiber Reinforced Plastics (FRP) are currently experiencing significant growth in popularity among industrial manufacturers. The appeal of these materials lies in their excellent specific mechanical properties, which enable the production of much lighter structures compared to traditional materials such as metals. Despite the wide range of manufacturing processes available for these materials, machining steps are still necessary to obtain the final parts. However, unprecedented challenges are encountered when machining composite materials. The aim of this thesis is to assess the possibility of improving the drilling process by adding additives to the epoxy matrix of composites. In this study, Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) were fabricated by incorporating two fillers into the matrix: wax and graphene. A total of nine different plates were machined using a tool with a true crystalline CVD diamond coating. To characterize machinability, cutting forces were measured using a dynamometric table, and cutting temperatures were measured using thermal camera. Roughness measurements were also taken on the surfaces of the drilled holes to study mechanical properties (the surface quality of the holes). Improvements in machinability without deteriorating mechanical properties were observed, particularly with a concentration of 2% wax and 0% graphene, where the effects were most significant. Cutting temperatures, forces, and roughness were significantly reduced by the addition of 0.25% graphene and 1% wax, without compromising the fiber/matrix interaction. This study demonstrated that adding additives to FRP is a viable option for improving machinability. This conclusion is of interest to industrial manufacturers, as the addition of additives can reduce manufacturing costs by minimizing damage and maximizing tool life.

Keywords: GFRP, Drilling, Mechanical properties, Wax, Graphene, CVD.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Matériaux composites	3
1.1.1 Généralités	3
1.1.2 Les matrices	5
1.1.3 Les renforts	5
1.1.4 Procédés de fabrication	8
1.1.4.1 La méthode d'infusion	8
1.1.4.2 La méthode de moulage par contact	9
1.2 Additifs de cire et de graphène	9
1.2.1 L'additif de type cire d'hydrocarbure	10
1.2.2 L'additif de type graphène	10
1.3 Usinage des FRP	13
1.3.1 Les outils de coupe.....	14
1.3.1.1 Outils de coupe en PCD	14
1.3.1.2 Outils de coupe en CVD	15
1.3.2 Les défauts issus de l'usinage	17
1.3.2.1 Défauts en perçage de composites	19
1.3.3 Influence des additifs sur la qualité d'une surface usinée.....	26
1.3.4 Influence des additifs sur les forces de coupe.....	29
1.3.5 Influence des additifs sur la température de coupe	31
1.4 Résumé.....	32
CHAPITRE 2 Objectif et méthodologie	35
2.1 Objectif de la recherche	35
2.2 Description du plan d'expérience	36
2.3 Procédé de fabrication des laminés GFRP	41
2.3.1 Dosage du mélange	41
2.3.2 Préparation des plaques en fibre de verre	44
2.3.3 Préparation des échantillons en fibre de verre	46
2.3.4 Polissage des échantillons moulés	48
2.3.5 Les interprétations sur les micrographies de GFRP 50X et 100X	50

2.4	Équipement et instruments de mesure	52
2.4.1	Équipement utilisé pour le perçage.....	52
2.4.2	Mesure de la rugosité de surface.....	55
CHAPITRE 3	Résultats et discussions	57
3.1	Introduction.....	57
3.2	Influence des paramètres de coupe et des pourcentages de graphène et de cire sur la force Fz de coupe	57
3.2.1	Évaluation de la Force de Coupe Fz	58
3.2.1.1	Évaluation de la force de coupe Fz pour les plaques GFRP a 0% de cire et a pourcentage de graphène variable	58
3.2.1.2	Évaluation de la force de coupe Fz pour les plaques GFRP à 1% de cire et à pourcentage de graphène variable	59
3.2.1.3	Évaluation de la force de coupe Fz pour les plaques GFRP a 2% de cire et a pourcentage de graphène variable	61
3.2.2	Paramètres influents et équations de prédiction des forces de coupe	63
3.3	Influences des paramètres de coupe et des pourcentages de graphène sur la température d'outil de coupe	63
3.3.1	Évaluation de la température de coupe	63
3.3.1.1	Impact de la concentration de cire sur la température d'usinage et l'incertitude associée	67
3.3.1.2	Impact de la concentration de graphène sur la température d'usinage et l'incertitude associée	68
3.3.1.3	Analyse de l'impact des concentrations de cire et de graphène sur la température moyenne en usinage	70
3.3.1.4	Impact de la vitesse d'avance sur la température d'usinage et l'incertitude associée	72
3.3.1.5	Impact de la vitesse de coupe sur la température d'usinage et l'incertitude associée	73
3.3.1.6	Comparaison des résultats de température de l'outil de coupe entre les plaques GFRP (C=0% et G=0%) et (C=2% et G=2%)	74
3.3.2	Paramètres influents et équations de prédiction des températures de l'outil de coupe	75
3.4	Influence des paramètres de coupe et les pourcentages des additifs sur les rugosités.....	75
3.4.1	Évaluation et analyse de la rugosité.....	75
3.4.1.1	Analyse de la rugosité de surface en fonction des conditions de coupe, des concentrations de cire et de graphène dans le procédé d'usinage	75
3.4.1.2	Analyse de la rugosité de surface en fonction des concentrations de cire et de l'incertitude associée	79

3.4.1.3	Analyse de la rugosité de surface en fonction des concentrations de graphène et de l'incertitude associée	80
3.4.1.4	Analyse de l'impact des concentrations de cire et de graphène sur la rugosité moyenne	82
3.4.1.5	Analyse de la rugosité de surface en fonction des vitesses de coupe et de l'incertitude associée	83
3.4.1.6	Analyse de la rugosité de surface en fonction des vitesses d'avance et de l'incertitude associée	84
3.4.2	Paramètres influents et équations de prédiction des rugosités	86
CHAPITRE 4	Effets of Wax and Graphene concentrations on Cutting Force in Drilling GFRP Composites	89
4.1	Abstract	89
4.2	Introduction	90
4.3	Materials and methods	92
4.4	Results and discussion	95
4.5	Conclusion	111
CONCLUSION	113
ANNEXE I	Code Matlab pour chercher la moyenne de force de coupe en régime transitoire.....	115
ANNEXE II	Code MATLAB pour tracer un graphe de trois surfaces différentes.....	119
ANNEXE III	Évaluation et analyse de la force de coupe Fz.....	121
ANNEXE IV	Évaluation et analyse de la température de foret après le perçage.....	139
ANNEXE V	Évaluation et analyse de la rugosité	161
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	179

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Des résines thermodurcissables et B : des résines thermoplastiques	5
Tableau 1.2 Les conditions de perçage tirée de Zenia (2017)	15
Tableau 2.1 Paramètres utilisés pour le perçage des plaques GFRP	37
Tableau 2.2 Plan expérimental avec les 3 répétitions	38
Tableau 2.3 Fractions pondérales des échantillons	41
Tableau 2.4 L'ordre de mélange par cisaillement	42
Tableau 2.5 Séquences de polissage des échantillons	49
Tableau 2.6 Paramètres du profilomètre	56
Tableau 4.1 Weight Fractions of the Samples	92
Tableau 4.2 Shear Mixing Sequence	93
Tableau 4.3 Cutting Parameters	94
Tableau 4.4 Summary of Normality Test Results	96
Tableau 4.5 Dummy Coding Variables with Three Levels	106
Tableau 4.6 Evaluation of the dummy variable regression model parameters at varying Graphene levels, with 0% Wax	107
Tableau 4.7 Evaluation of the dummy variable regression model parameters at varying Wax levels, with 0% Graphene	110

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Les compositions des matériaux composites.....4
Figure 1.2	La composition de matériaux composites de l'avion Airbus 380 tirée de Maria (2013)4
Figure 1.3	Différents types de forme/taille de fibres tirée de Charfi (2020)6
Figure 1.4	La méthode d'infusion tirée El-Ghaoui, Chatelain, Ouellet-Plamondon, et al (2019).....8
Figure 1.5	La méthode de moulage par contact tirée de Gautam et al (2023).....9
Figure 1.6	Structure du graphène extraite de Zhen & Zhu, (2018)11
Figure 1.7	Réseau hexagonal de graphène extraite de Zhen & Zhu, (2018)11
Figure 1.8	les techniques de synthèse tirée de Z. Wang et al, (2024).....13
Figure 1.9	Comparaison entre les résultats de la simulation numérique et les résultats expérimentaux pour les efforts d'avance Fz en fonction de la vitesse d'avance tirée de Zenia, (2017)16
Figure 1.10	Les différents types de délaminage après usinage tirée de El-Ghaoui, (2019)18
Figure 1.11	Arrachement de fibres et fissuration tirée de Nguyen-Dinh et al (2018) ...18
Figure 1.12	La photo de fumée et matrice brûlée durant l'usinage des CFRP extraite de Slamani et al, (2019).....19
Figure 1.13	Défauts de perçage tiré de Gohorianu (2008)20
Figure 1.14	Délaminage en (a) entrée de trou et en (b) sortie de trou tirée de Zenia (2017)20
Figure 1.15	L'influence de vitesse de coupe sur le délaminage en sortie de trou tirée de Zenia (2017).....21
Figure 1.16	Image MEB réalisée sur un échantillon poli du composite CFRP à couches multiples $[-45^{\circ}, 0^{\circ}, -45^{\circ}]$ tirée de Zenia (2017).....21

Figure 1.17	L'évolution de la surface rugueuse en fonction de la longueur de coupe dans le Test 3 (lors du fraisage ascendant dans le pli à -45°) tirée de Hamedanianpour & Chatelain (2013).....	22
Figure 1.18	Effet des paramètres de processus sur la rugosité de surface dans la direction longitudinale tirée de J. Sheikh-Ahmad et al (2012).....	23
Figure 1.19	Mécanismes de coupe pour les composites FRP tirée de Nele et al (2021)	24
Figure 1.20	Surface de fracture en traction des composites renforcés avec une orientation des fibres de (a) 45° , (b) 60° et (c) 90° tirée de Kumar & Singh (2020)	25
Figure 1.21	Observation microscopique d'une surface en usinage conventionnel et usinage vibratoire tirée de Nele et al (2021).....	26
Figure 1.22	(a) L'effet de l'ajout de graphène sur la qualité de surface, et (b) comparaison entre les résultats obtenus entre les deux surfaces usinées tirée de El-Ghaoui, Chatelain, & Ouellet-Plamondon (2019)	27
Figure 1.23	États de surface des différents stratifiés sur microscope ($250\text{ }\mu\text{m/div}$) tirée de Togue (2019)	28
Figure 1.24	L'effet de l'AM sur la rugosité des plaques tirée de Togue (2019).....	29
Figure 1.25	Influence de concentration de Graphene sur la force tirée de El-Ghaoui, Chatelain, & Ouellet-Plamondon (2019).....	30
Figure 1.26	L'effet de concentration sur la force d'avance tirée de Togue (2019)	30
Figure 1.27	Influence de graphène sur la température tirée de Mathieu et al (2022)	31
Figure 1.28	L'effet du graphène sur la température tirée de El-Ghaoui, Chatelain et Ouellet- Plamondon (2019)	32
Figure 2.1	Configuration de perçage avec trois répétitions T1, T2 et T3	37
Figure 2.2	Signal brut de la force de poussée	40
Figure 2.3	Diagramme explicatif pour la recherche de la moyenne en régime permanent transitoire	40
Figure 2.4	(a,b) Mélange d'époxy avec le graphène, la cire et le durcisseur, (c) le mélange dans un bain de glace	43
Figure 2.5	Processus de préparation du mélange.....	44

Figure 2.6	Préparation du moule et du matériel à utiliser.....	45
Figure 2.7	L'ajout du mélange et imprégnation avec le rouleau manuel	46
Figure 2.8	Application du sous-vide et processus de durcissement sous presse	46
Figure 2.9	Application du sous-vide et processus de durcissement sous presse	47
Figure 2.10	Le principe de polissage	48
Figure 2.11	Le support des échantillons utilisé	49
Figure 2.12	Les micrographies de GFRP 50X et 100X.....	52
Figure 2.13	Centre d'usinage Huron K2X10 tirée de LORJUSTE (2024).....	53
Figure 2.14	Outil de coupe et montage d'usinage sur la table dynamométrique.....	54
Figure 2.15	Caméra thermique VarioCAM® HD head 900.....	54
Figure 2.16	Analyse thermique de l'outil après le perçage avec les paramètres de coupe ($V_c=50\text{mm/min}$ et $N_f=0.04\text{mm/tr}$) prise par le logiciel GRAYESS IRT Analyser	55
Figure 2.17	Deux positions différentes pour mesurer la rugosité.....	56
Figure 3.1	Influence de 0% de cire et de pourcentage de graphène variable (0,0.25,2) sur la force de coupe F_z	59
Figure 3.2	Influence de 1% de cire et de pourcentage de graphène variable (0,0.25,2) sur la force de coupe F_z	61
Figure 3.3	Influence de 2% de cire et de pourcentage de graphène variable (0,0.25,2) sur la force de coupe F_z	62
Figure 3.4	Effet de la vitesse d'avance sur la température à différentes vitesses de coupe et concentrations de cire et de graphène	64
Figure 3.5	Effet de la vitesse de coupe sur la température à différentes vitesses d'avance et concentrations de cire et de graphène	65
Figure 3.6	Contribution des Paramètres d'Usinage à la Température Générée : Diagramme Circulaire en 3D.....	66
Figure 3.7	Températures en fonction de la concentration de cire, indépendamment des autres paramètres.....	68

Figure 3.8	Températures en fonction de la concentration de graphène, indépendamment des autres paramètres69
Figure 3.9	Évolution de la température moyenne en fonction de la concentration de cire-graphène, indépendamment des autres paramètres71
Figure 3.10	Températures en fonction des vitesses d'avance indépendamment des autres paramètres72
Figure 3.11	Comparaison des résultats de température de l'outil de coupe entre les plaques GFRP (C=0% et G=0%) et (C=2% et G=2%)74
Figure 3.12	Effet de la vitesse d'avance sur la rugosité de la surface à différentes vitesses de coupe et concentrations de cire et de graphène76
Figure 3.13	Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité à différentes vitesses d'avance et concentrations de cire et de graphène 77
Figure 3.14	Contribution relative de l'avance, de la vitesse de coupe, de la cire et du graphène à la rugosité de surface.....79
Figure 3.15	Rugosité en fonction de la concentration de cire, indépendamment des autres paramètres80
Figure 3.16	Rugosité en fonction de la concentration de graphène, indépendamment des autres paramètres.....81
Figure 3.17	Évolution de la rugosité moyenne en fonction de la concentration de cire-graphène, indépendamment des autres paramètres83
Figure 3.18	Rugosité en fonction des vitesses de coupe indépendamment des autres paramètres.....84
Figure 3.19	Rugosité en fonction des vitesses d'avance indépendamment des autres paramètres.....86
Figure 4.1	Experimental setup for the drilling process and cutting force measurement94
Figure 4.2	Pathway for Hole Drilling with Repetitions T1, T2, and T395
Figure 4.3	Initial 16 drilled holes repeated in triplicate under varied Cutting Conditions.....95
Figure 4.4	Effect of the feed rate on the average cutting force at different cutting velocities and wax and graphene concentrations.....98

Figure 4.5	Effect of the cutting velocity on the average cutting force at different feed rates and wax and graphene concentrations.....	100
Figure 4.6	Percentage Contribution of Variables Tested on Average Cutting Force .	101
Figure 4.7	Effects of Graphene Concentration on Average Cutting Force	102
Figure 4.8	Effects of Wax Concentration on Average Cutting Force	102
Figure 4.9	Effects of Feed Rate on Average Cutting Force.....	103
Figure 4.10	Effects of Cutting Velocity on Average Cutting Force	104
Figure 4.11	Effects of Wax-Graphene Concentrations on Average Cutting Force	105
Figure 4.12	Response surface plot for predicted and experimental values at varying Graphene levels, with 0% Wax	108
Figure 4.13	Response surface plot for predicted and experimental values at varying Wax levels, with 0% Graphene	111

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

GFRP	Polymères renforcés de fibre de verre
CFRP	Polymère renforcé de fibres de carbone
CVD	Outil avec revêtement de diamant cristallin
PCD	Outil avec revêtement en polycristallin
CBN	Outil avec revêtement Cubic Boron Nitride
FRP	Polymères renforcés de fibres
MMC	Composites à matrice métallique
CMC	Composites à matrice céramique
PMC	Composites à matrice polymères
W_d	Poids du durcisseur (g)
W_g	Pourcentage en poids du graphène
W_c	Pourcentage en poids de la cire
W_{ep}	Poids de l'époxy (g)
W_A	Pourcentage en poids du graphène et de la cire combinée (%)
W_t	Poids total (g).
T_f	Température (°C)
ε_t	Déformation tangentielle (%)
ρ_t	Densité temporelle (Kg/m^3)

σ_t Contrainte tangentielle (MPa)

E Module de Young (GPa)

σ_c Contrainte de compression

INTRODUCTION

Le développement des matériaux composites est intrinsèquement lié aux progrès de l'ingénierie et de la technologie. Bien que l'utilisation de matériaux composites ne représente pas une innovation nouvelle dans la gamme des matériaux dont dispose l'humanité, leurs applications révolutionnaires sont particulièrement visibles depuis la Seconde Guerre mondiale (Mahmood, 2023). Les composites sont fabriqués en combinant stratégiquement différents matériaux et parmi les plus utilisés, on retrouve le polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP) et le polymère renforcé de fibres de verre (GFRP).

La performance exceptionnelle des matériaux composites renforcés par des fibres ouvre la voie à d'importantes avancées dans le développement et l'innovation technologique, notamment dans les secteurs à haute performance tels que l'industrie aéronautique, l'aérospatiale, l'automobile et l'aviation. Ces matériaux contribuent significativement jusqu'à 20 % de plus que les métaux traditionnels comme l'aluminium à la conception structurelle et à la résistance aux impacts environnementaux, grâce à leurs propriétés mécaniques et thermiques (Mrázová, 2013).

Cette avancée favorise des impacts notables : elle encourage la popularisation du nautisme, optimise l'efficacité énergétique et l'aérodynamique, tout en améliorant les performances des avions et des véhicules. Ces améliorations se manifestent par une réduction de poids de 20 à 50%, une optimisation des géométries complexes et une diminution des coûts de fabrication. Par exemple, l'A350XWB et l'A380 sont composés à 53 % de composites, tandis que l'A400M en est composé de 30% (Mrázová, 2013).

Bien que les matériaux composites présentent divers avantages, ils présentent également des inconvénients lorsqu'ils sont utilisés en raison de leur structure hétérogène et anisotrope. Cette complexité commence dès l'usinage et entraîne des problèmes de qualité et de découpe. Ces processus de perçage, découpage et fraisage entraînent souvent des dommages mécaniques et thermiques, qui peuvent affecter la qualité des matériaux et les performances des pièces usinées. Les effets les plus fréquemment observés comprennent le délaminage, l'arrachage des fibres et la présence de fibres non coupées ainsi que l'usure rapide des outils de coupe.

Pour cette raison, plusieurs études ont été menées pour réduire ces imperfections, en introduisant des additifs et en optimisant certains paramètres tels que le choix de l'outil, la vitesse d'avance et la vitesse de coupe.

Dans le cadre de cette recherche, on va évaluer l'impact du graphène et de la cire sur la qualité du perçage du composite verre/époxy (GFRP). Cette étude vise principalement à analyser comment le graphène et la cire influent sur la qualité des trous générés, en considérant des paramètres tels que la température, les forces de coupe et la rugosité de surface. On a examiné également l'impact des additifs sur la porosité de surface de matériau composite en verre.

Ce projet de recherche pourrait contribuer à améliorer les techniques d'usinage, à optimiser les matériaux composites et à promouvoir l'innovation technologique dans le domaine de la fabrication de composants en GFRP.

Ce travail commencera par une revue de littérature, en vue d'adopter une méthodologie appropriée pour mener à bien ce projet de recherche. Par la suite, la méthodologie sera présentée puis les résultats mèneront à des recommandations.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Au départ, ce chapitre se propose d'introduire de manière générale les matériaux composites, en examinant en détail leurs compositions, caractéristiques et applications, ainsi que les méthodes de fabrication correspondantes. Par la suite, il examinera les recherches antérieures sur l'usinage.

1.1 Matériaux composites

1.1.1 Généralités

Les éléments constitutifs à l'échelle macro peuvent être des matrices, des additifs et des charges. La combinaison entre deux ou plusieurs macro-constituants différents en termes de formes et de compositions chimiques conduit à produire les matériaux composites. Les composites modernes sont classés selon la base du matériau de la matrice. Il existe trois catégories différentes : des composites à matrice métallique (MMC), les composites à matrice céramique (CMC) et les composites à matrice polymères (PMC) ou les fibres renforcées par des plastiques (FRP). Dans le cadre de cette recherche on va se concentrer sur la troisième catégorie et plus précisément au polymère renforcé par des fibres de verre, soit le GFRP (Glass Fibre Reinforced Plastic). La figure 1.1 présente la composition des matériaux composites à base de fibres (Mrázová, 2013).

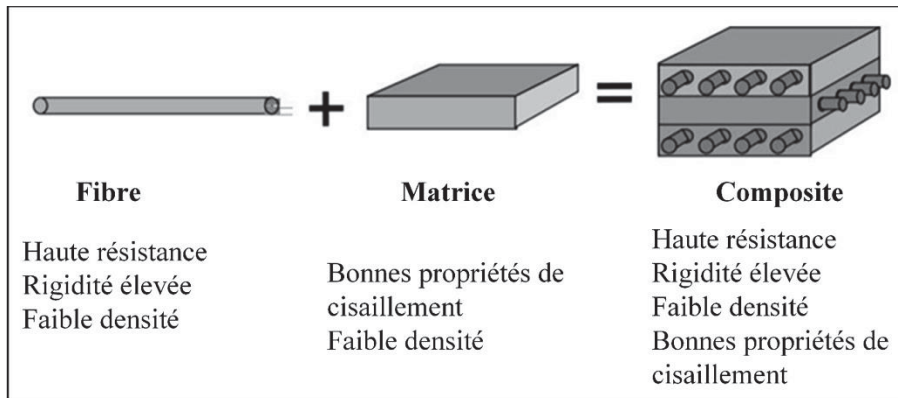


Figure 1.1 Les compositions des matériaux composites

Tirée de Mrázová (2013)

Les composites FRP sont largement utilisés en raison de leurs avantages, notamment de leur résistance spécifique élevée et de leurs coûts de fabrication intéressants. L'industrie aéronautique se montre particulièrement intéressée par les bénéfices des composites. Par exemple, l'Airbus A350XWB est composé à 53% de matériaux composites, 19% d'alliages d'aluminium, 14% de titane et 6% d'acier. De manière similaire, l'empennage, la porte cargo arrière et les pales d'hélice de l'avion A400M bénéficient également de ces propriétés. Mentionnons aussi le caisson central de l'aile de l'A380 qui est un autre exemple de l'utilisation fructueuse des composites dans l'industrie aéronautique, soit le GFRP dans ce cas-ci (Mrázová, 2013). La figure 1.2 montre la composition en matériaux composites de l'avion A380.

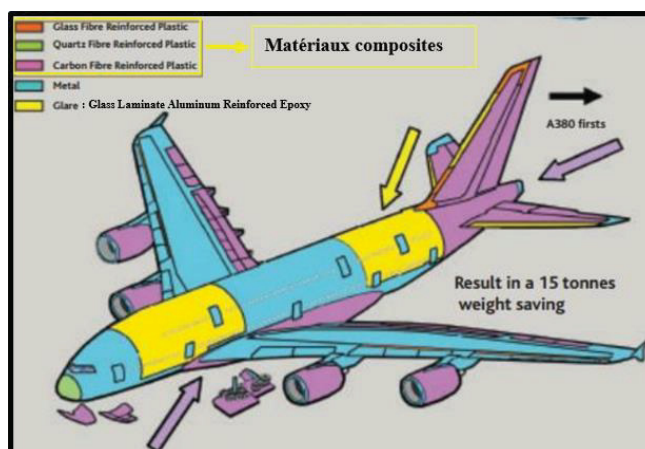


Figure 1.2 La composition de matériaux composites de l'avion Airbus 380

Tirée de Mrázová (2013)

1.1.2 Les matrices

Par définition, la matrice est la matière continue qui relie les différentes composantes d'un matériau composite. Elle peut être thermodurcissable ou bien thermoplastique. La différence entre les deux familles est la réversibilité thermique. Les thermodurcissables et les thermoplastiques se distinguent principalement par leur réaction à la chaleur. Les thermodurcissables subissent une réaction chimique irréversible lorsqu'ils sont chauffés, ce qui les solidifie de manière permanente. En revanche, les thermoplastiques peuvent être fondus et remodelés plusieurs fois sans subir de changement chimique permanent, offrant ainsi une plus grande flexibilité dans la fabrication et la recyclabilité. Le tableau 1.1 présente les caractéristiques des résines thermoplastiques et les résines thermodurcissable (Gornet & Ijaz, 2011)

Tableau 1.1 A : Des résines thermodurcissables et B : des résines thermoplastiques
Tiré de Gornet et Ijaz (2011)

A						
résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	ρ (Kg/m ³)	$\epsilon_t^R(\%)$	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
polyesters	60 à 100	1 140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
phénoliques	120	1 200	2,5	40	250	3 à 5
epoxydes	290	1 100 à 1 500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5
B						
résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	ρ (kg/m ³)	$\epsilon_t^R(\%)$	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
polyamide	65 à 100	1 140		60 à 85		1,2 à 2,5
polypropylène	900	1 200		20 à 35		1,1 à 1,4

1.1.3 Les renforts

Les renforts sont des éléments fondamentaux des matériaux composites, offrant une palette diversifiée de propriétés. Les incorporations des renforts permettent de développer les matériaux adaptés à une variété d'applications, allant de l'aérospatiale à l'industrie automobile, ou encore aux applications médicales et de la construction. Les fibres de renforcement sont stratégiquement intégrées dans une matrice pour créer un matériau composite synergique qui surpasse les caractéristiques individuelles de chaque composant. L'orientation des fibres

influence les propriétés mécaniques des composites, chaque type offrant des caractéristiques spécifiques adaptées à des applications variées, comme la résistance dans une direction particulière ou une répartition homogène des contraintes. La figure 1.3 illustre quatre exemples d'orientations possibles des fibres dans les matériaux composites (Stochioiu, 2020).

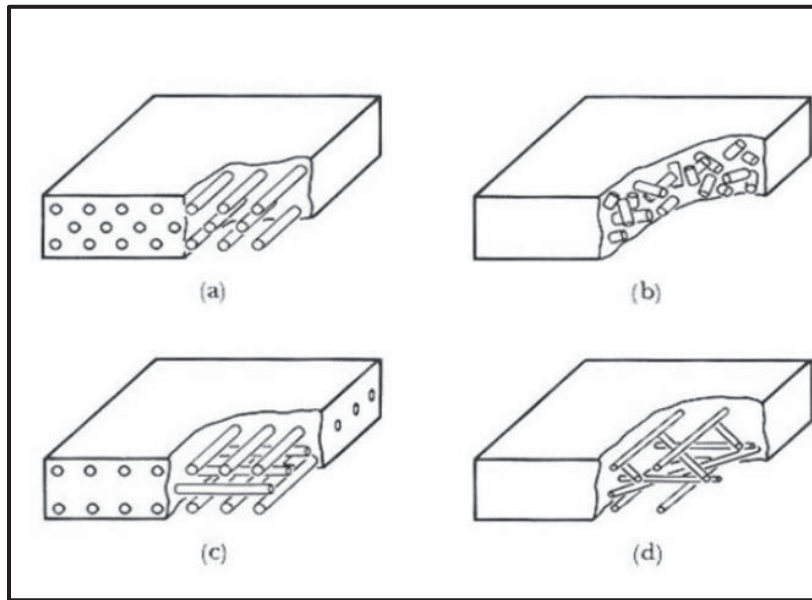


Figure 1.3 Différents types d'orientation des fibres : a) unidirectionnelle ; b) aléatoire ; c) bidirectionnel ; d) multidirectionnel
Tirée de Constantin Stochioiu (2020)

Le rôle essentiel des fibres est d'assurer la résistance, la rigidité et d'améliorer les propriétés mécaniques et structurelles du matériau, conférant ainsi une robustesse et une performance supérieures. Le choix des fibres de renfort est fait selon la fonction de leurs propriétés intrinsèques exceptionnelles (Okafor, Sunday, Ekwueme, Nwanna, & Ihueze, 2023). Par exemple la fibre de verre, prisée pour sa légèreté et son coût abordable, offre une excellente résistance à la traction. D'un autre côté, la fibre de carbone, réputée pour sa légèreté exceptionnelle et sa résistance élevée, est souvent utilisée dans des applications nécessitant une performance structurelle supérieure (Madhavadas et al., 2022). L'aramide, connue sous le nom de Kevlar, présente une résistance aux chocs exceptionnelle et est fréquemment utilisée dans des applications nécessitant une grande résistance (Fei, 2018) .

Outre les fibres, les particules de renfort, telles que les particules de céramique ou les nanotubes de carbone, jouent un rôle crucial dans l'amélioration des propriétés des composites (Vallet, 2014). Les particules de céramique, en raison de leur dureté et de leur résistance à l'usure, sont souvent intégrées pour renforcer la résistance à l'abrasion des matériaux composites (Soufiane, Kamel, Oussama, & Slamani, 2021). Les nanotubes de carbone, quant à eux, apportent des améliorations significatives en termes de conductivité électrique et thermique (Lee, Yoo, Kim, Kang, & Park, 2022).

L'arrangement des renforts au sein de la matrice, qu'il s'agisse d'une disposition unidirectionnelle, bidirectionnelle ou multidirectionnelle, influence directement les performances finales du matériau composite. Une conception stratégique permet d'optimiser les propriétés telles que la résistance, la rigidité, la conductivité, et la durabilité, en fonction des exigences spécifiques de chaque application.

Tel que mentionné en introduction, cette recherche porte spécifiquement sur le composite à renfort de fibres de verre. Le composite GFRP représente une catégorie de matériaux polyvalents jouant un rôle majeur dans l'évolution de l'industrie des matériaux composites. Les fibres les constituant sont fabriquées à partir de fins filaments de verre qui sont formés par l'extrusion de verre en fusion à travers de minuscules trous. Ces filaments peuvent être tissés ou agencés de manière aléatoire pour former des tissus de fibres de verre, qui servent ensuite de renforts dans les composites. Les propriétés mécaniques exceptionnelles des fibres de verre en font un choix privilégié dans la fabrication de matériaux composites. Elles sont réputées pour leur résistance élevée à la traction, leur rigidité, et leur résistance à la corrosion. De plus, elles présentent une excellente résistance aux environnements agressifs, aux produits chimiques, et aux conditions climatiques variées.

L'une des caractéristiques les plus attrayantes des fibres de verre est leur malléabilité. Elles peuvent être moulées pour prendre différentes formes, offrant ainsi une grande flexibilité dans la conception et la fabrication de composants. Cette adaptabilité les rend également idéales pour la production de pièces complexes et de structures nécessitant des formes spécifiques. Les fibres de verre occupent une place prépondérante dans le monde des matériaux composites, apportant une contribution significative à diverses industries. Leur combinaison de résistance,

de légèreté, et de malléabilité les positionne comme un choix incontournable pour de nombreuses applications, contribuant ainsi de manière significative à l'innovation et à la durabilité dans divers secteurs tels que l'aérospatiale, l'aéronautique, la construction navale, et l'automobile pour ne nommer que ceux-ci (El-Ghaoui, Chatelain, & Ouellet-Plamondon, 2019b).

1.1.4 Procédés de fabrication

Pour la fabrication de laminés à base de fibres et de résine (FRP), diverses méthodes sont employées parmi lesquelles se distinguent deux approches fondamentales : la méthode de moulage par transfert de résine sous vide (infusion) et la méthode de moulage par contact.

1.1.4.1 La méthode d'infusion

La méthode d'infusion commence par le positionnement méticuleux des fibres sèches sur un moule, en respectant une orientation spécifique selon le cahier des charges. Ensuite, un sac servant à faire un vide est installé pour couvrir les fibres. Celui-ci comporte deux orifices, l'une pour l'injection de la résine et l'autre pour l'évacuation de l'excès de résine. Cette approche repose sur des principes scientifiques avancés visant à optimiser la distribution de la résine au sein des fibres, assurant ainsi une répartition homogène et minimisant les défauts potentiels tels que les bulles d'air. Pour une compréhension visuelle, la figure 1.4 décrit ce procédé.

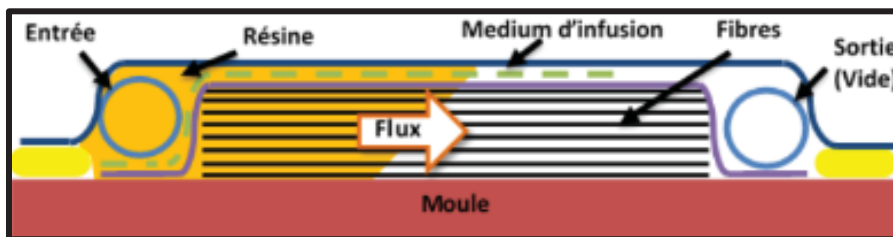


Figure 1.4 La méthode d'infusion

Tirée El-Ghaoui, Chatelain, Ouellet-Plamondon, et al (2019)

1.1.4.2 La méthode de moulage par contact

Cette méthode, généralement préférée pour la fabrication en petite quantité, suit un processus séquentiel. Dans la première étape, le moule est préparé avec une base en papier plastique lisse. Les opérations suivantes consistent à superposer les couches de fibres, par exemple, de la fibre de verre, et à appliquer manuellement un mélange préparé, en utilisant un rouleau pour garantir une intégration efficace entre les couches. Cette approche vise à éviter tout excès de mélange, à éliminer les bulles d'air et à prévenir la formation de plis indésirables. Le processus se poursuit avec l'ajout de couches successives, chacune étant soumise aux mêmes étapes rigoureuses pour assurer une cohérence optimale. Une pompe à vide permet par la suite de faire le vide grâce à l'application d'un sac. L'ensemble est ensuite placé dans une presse, et soumis à une température précise pour finaliser le processus de durcissement. La figure 1.5 décrit ce procédé (Gautam et al., 2023).

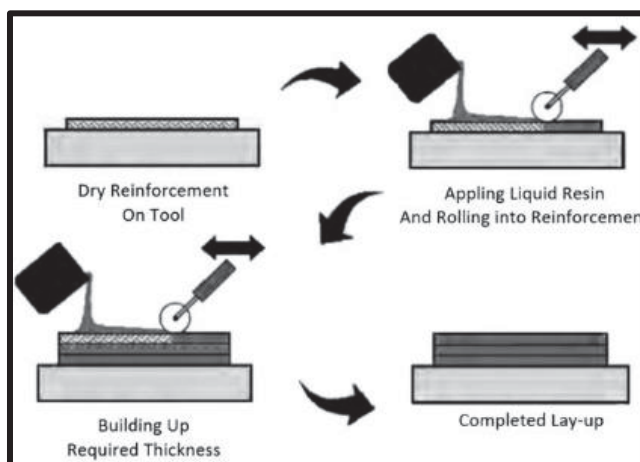


Figure 1.5 La méthode de moulage par contact
Tirée de Gautam et al (2023)

1.2 Additifs de cire et de graphène

Dans le cadre de cette recherche, des additifs de cire et de graphène seront introduits en différentes concentrations dans une résine époxy pour fabriquer des plaques laminées GFRP. L'effet de ces additifs sur l'usinabilité en perçage sera étudié. Cette section présente les caractéristiques de ces additifs.

1.2.1 L'additif de type cire d'hydrocarbure

La cire d'hydrocarbure est définie comme une substance solide ou semi-solide composée exclusivement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Ces particules sont utilisées pour diverses applications, notamment l'amélioration des propriétés tribologiques, le contrôle de la fluidité et de la conductivité électrique ou thermique de la matrice polymère, ainsi que pour optimiser la dispersion des charges et prolonger la durabilité du matériau.

Les particules sphériques de cire d'hydrocarbure à l'échelle micrométrique sont préférées aux grosses particules, car ces dernières peuvent altérer l'aspect final des surfaces externes de la pièce.

L'accouplement de cire et de graphène dans les composites peut contribuer à diminuer la chaleur générée pendant le processus d'usinage ainsi que de réduire l'usure de l'outil de coupe (El-Ghaoui, Chatelain, & Ouellet-Plamondon, 2019a).

1.2.2 L'additif de type graphène

Au cours des dernières années, les recherches quant à l'exploitation du graphène ont mené à différentes applications, notamment dans le domaine de l'ingénierie des matériaux, de l'énergie et de la santé (Randviir, Brownson, & Banks, 2014). Le graphène est une forme particulière du carbone, adoptant une disposition en réseau hexagonal à deux dimensions à l'échelle atomique (figure 1.6). Chaque nœud du réseau est occupé par un atome de carbone sp^2 , formant des liaisons covalentes dans un plan et permettant la délocalisation électronique. Il peut être considéré comme une structure de base présente dans le graphite, les nanotubes de carbone, les fullerènes, ainsi que dans des molécules aromatiques de taille infinie, comme les aromatiques polycycliques extrêmement plates (Zhen & Zhu, 2018).

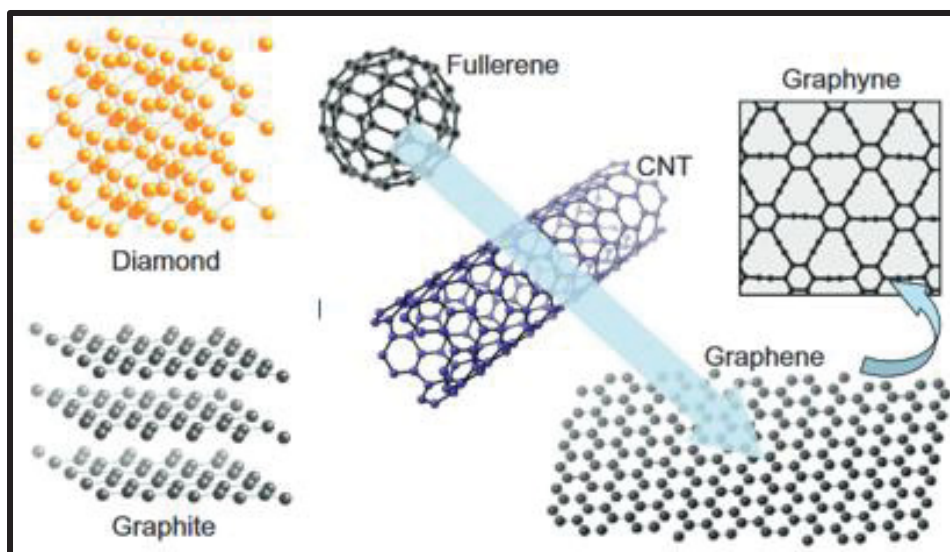


Figure 1.6 Structure du graphène

Extraite de Zhen & Zhu (2018)

L'épaisseur des particules de graphène peut varier sur l'échelle monoatomique entre 0,345 nm et 100 nm (Imran & Shivakumar, 2018) alors que la longueur de la liaison carbone-carbone est d'environ 0,142 nm. La figure 1.7 illustre le réseau hexagonal du graphène.

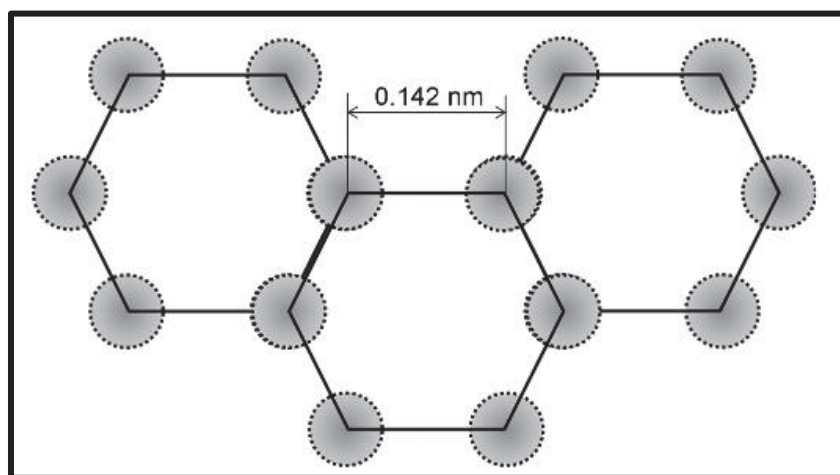


Figure 1.7 Réseau hexagonal de graphène

Extraite de Zhen & Zhu (2018)

Le graphène présente des propriétés exceptionnelles. Par exemple, son module de Young et sa résistance ultime par couche sont respectivement d'environ 1 TPa et 130 GPa (Chihi, 2021), ce qui souligne sa résistance mécanique remarquable. De plus, le graphène se caractérise par une

conductivité thermique élevée, atteignant environ 5 000 W/(m.K), ce qui en fait un excellent conducteur de chaleur. Sa conductivité électrique est également remarquable, atteignant près de 6 000 S/cm, ce qui en fait un matériau très conducteur pour les applications électroniques (Zhen & Zhu, 2018).

La production de graphène s'effectue à deux niveaux : ascendant et descendant. La synthèse ascendante du graphène fait référence à la création du graphène à partir de molécules ou d'atomes individuels, en construisant la structure couche par couche. Cela peut être réalisé par des techniques telles que le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), la croissance épitaxiale sur SiC, la décharge à l'arc, la décomposition de nanotubes de carbone, la conversion chimique et l'auto-assemblage de tensioactifs. En revanche, la synthèse descendante du graphène consiste à produire du graphène à partir de matériaux de départ plus volumineux, tels que le graphite, en les réduisant en couches de graphène.

La synthèse ascendante du graphène présente plusieurs avantages par rapport à la synthèse descendante. Tout d'abord, la synthèse ascendante permet la fabrication de nanorubans de graphène unidimensionnels et de structures nanoporeuses avec une précision et une maîtrise accrue. De plus, cette méthode offre la possibilité de contrôler plus finement les propriétés du graphène produit, ce qui est essentiel pour de nombreuses applications. En outre, la synthèse ascendante permet d'obtenir du graphène de haute qualité avec des caractéristiques spécifiques, ce qui est particulièrement important pour les applications exigeant des performances élevées. Enfin, cette approche ouvre la voie à de nouvelles avancées dans la recherche et le développement de technologies exploitant les propriétés uniques du graphène (Charfi, 2020). La figure 1.8 présente diverses techniques de synthèse du graphène (Y. Wang et al., 2022).

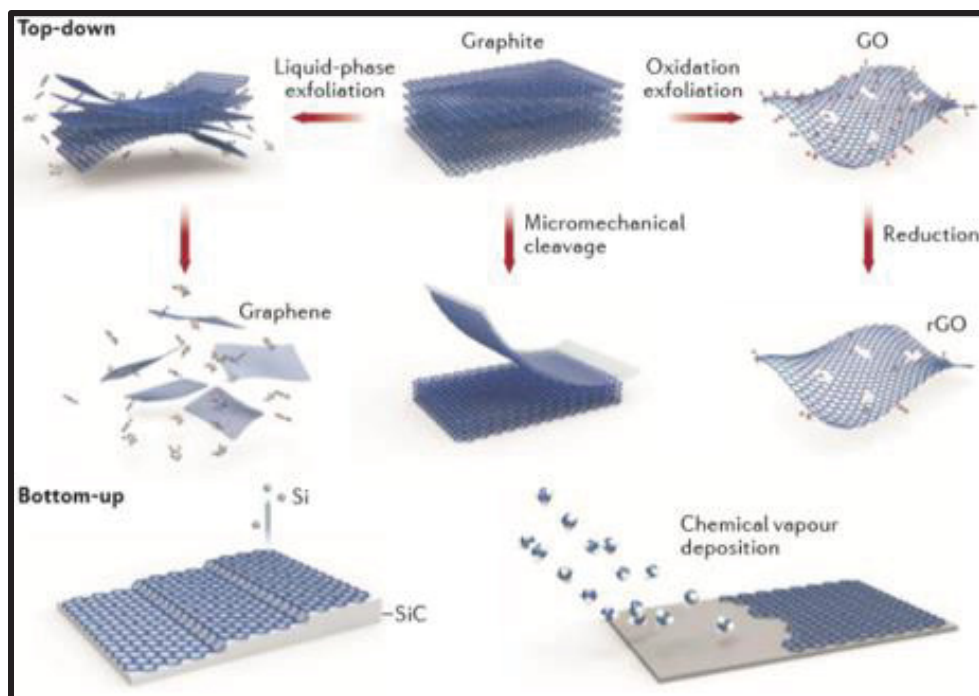


Figure 1.8 les techniques de synthèse

Tirée de Z. Wang et al (2024)

L'ajout de graphène aux métaux, aux polymères et aux céramiques peut créer des nouveaux matériaux qui sont les matériaux composites selon la base de matière utilisée afin d'avoir des caractéristiques hors du commun, incluant une conductivité électrique et thermique exceptionnellement élevée, une résistance mécanique importante ainsi qu'une légèreté remarquable (Nele, Caggiano, & Improtta, 2021).

1.3 Usinage des FRP

L'usinage des matériaux composites diffère de celui des métaux conventionnels et de leurs alliages. Dans l'usinage des composites, le comportement non homogène et anisotrope dépend de divers renforts, propriétés du renforcement, et de la fraction volumique de la matrice et du renfort. L'outil rencontre alternativement des matériaux de matrice et de renfort, leur réponse à l'usinage peut être totalement différente, imposant des exigences particulières en matière de géométrie et de résistance à l'usure des outils de coupe.

La diversité de matériaux utilisés pour la fabrication de l'outil de coupe qui sont utilisés pour faire l'usinage de matériaux composites sont : l'acier rapide, le carbure, le CBN, le PCD (revêtement en polycristallin) et le CVD (avec revêtement de dépôt chimique de phase vapeur pour les carbures) (Charfi, 2020).

Le principal problème de l'usinage des composites est l'usure élevée de l'outil qui, dans certaines circonstances, conduit à un processus de production non rentable ou rend le processus impossible. Cette usure est due principalement au contact direct entre les particules ou les fibres de renforcement et l'arête de coupe, qui provoque une charge mécanique et thermique sur l'arête de coupe.

1.3.1 Les outils de coupe

1.3.1.1 Outils de coupe en PCD

Les outils en diamant polycristallin (PCD) offrent une alternative prometteuse aux outils en carbure en raison de leur qualité supérieure et de leur rentabilité. Leur durée de vie prolongée compense leur coût initial plus élevé. De plus, ces outils permettent des vitesses de coupe élevées tout en maintenant une durabilité satisfaisante par rapport aux outils concurrents.

Les conclusions de (Karabibene, 2017) confirment l'avantage de l'utilisation d'outils de PCD pour l'usinage de GFRP. Cette recommandation vise à optimiser le processus de coupe, car l'utilisation d'outils non revêtus entraîne des signes d'usure prématurée au niveau de la pointe de l'arête de coupe. En prenant comme exemple l'usinage de GFRP (verre/époxy), il est démontré que l'outil en PCD, caractérisé par une dureté extrêmement élevée, est plus approprié que l'outil en carbure 28072, surtout avec des paramètres optimaux de 200 mm/min pour la vitesse de coupe et de 0,1 mm/rev pour la vitesse d'avance intermédiaire dans le cas de cette étude.

D'autre part, (Zenia, 2017) a mené des essais d'outils en perçage de fibres longues de CFRP disposées dans la configuration $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$. Les échantillons ont été fabriqués en empilant des couches unidirectionnelles par moulage sous vide alors que le perçage a été réalisé

selon des conditions d'usinage spécifiques présentées dans le tableau ci-dessous. La vitesse de rotation N reste constante à 2500 tr/min. Deux forets hélicoïdaux sont utilisés. Le premier est en carbure monobloc revêtus de PCD (diamant synthétique) avec un angle de pointe de 130° , un angle d'hélice de $34,9^\circ$, un angle de dépouille de 24° et un diamètre de 4 mm. Le deuxième est un foret en carbure monobloc non revêtu CoroDrill® de diamètre 4,17 mm. Le tableau 1.2 montre les vitesses d'avance testées dans ce plan d'expérience. Il a été démontré que l'utilisation de forets en PCD permettait d'améliorer la qualité de la surface percée et de prolonger la durée de vie de l'outil de coupe, c'est-à-dire le foret (Zenia, 2017).

Tableau 1.2 Les conditions de perçage
Tiré de Zenia (2017)

	Vz1= 300	Vz2 = 500	Vz3 =700	Vz3 =900	Trous percés
Outil PCD	5	5	5	5	35
Outil carbure	5	5	5		

1.3.1.2 Outils de coupe en CVD

Par définition, le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est une technique de revêtement ou de fabrication de films minces qui implique la croissance d'une couche de matériau sur un substrat à partir de réactions chimiques en phase gazeuse (Zenia, 2017). Au cours de la dernière décennie, les progrès dans le développement de cette technologie de revêtement ont facilité la réalisation de couches autoportantes d'une épaisseur d'un millimètre sur des surfaces plus étendues (Khlyustova, Cheng, & Yang, 2020). Le diamant obtenu par dépôt chimique en phase vapeur (CVD), composé essentiellement de carbone pur sans phase liante, exhibe une dureté bien supérieure (10000 HV) à celle du diamant polycristallin (PCD) évaluée à 6000 HV. Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est donc utilisé pour revêtir les outils, optimisant ainsi leur durabilité et leur résistance à l'usure.

Le procédé CVD appliqué aux carbures offre une uniformité de dépôt sur les surfaces permettant d'obtenir des revêtements conformes même sur des géométries tridimensionnelles complexes telles celles associées aux outils de coupe. Cette uniformité est cruciale pour assurer des performances homogènes sur toute la surface du matériau traité.

En résumé, le CVD appliqué aux carbures représente une solution technologique avancée pour la production de revêtements offrant une dureté exceptionnelle, une résistance à l'usure accrue et une adhérence robuste. Ces caractéristiques en font des matériaux de choix dans des secteurs variés, allant de l'industrie des outils de coupe à celle des semi-conducteurs, où des performances mécaniques de haut niveau sont essentielles.

Alors que la majorité des recherches préconisent l'utilisation d'outils en diamant polycristallin (PCD) pour l'usinage de composites à matrice renforcée de fibres de carbone (CFRP) et de verre (GFRP), cette étude se focalisera sur l'utilisation d'outils revêtus en diamant CVD cristallin. L'objectif principal est d'analyser l'influence des conditions de perçage sur les échantillons produits avec différentes concentrations d'additifs. De plus, l'utilisation d'outils neufs nous permettra de négliger l'effet de l'usure dans nos expériences.

Comme mentionné précédemment, (Zenja, 2017) a démontré que l'utilisation de forets en PCD est préférable à d'autres types de forets pour améliorer la qualité de la surface percée et prolonger la durée de vie de l'outil de coupe. Dans ses recherches, Sofiane a également validé que l'accroissement de la vitesse d'avance conduit à une augmentation des forces d'avance, tel que démontré dans la figure 1.9. En outre, il a consolidé les résultats expérimentaux par le biais d'une simulation numérique, renforçant ainsi les conclusions de son étude.

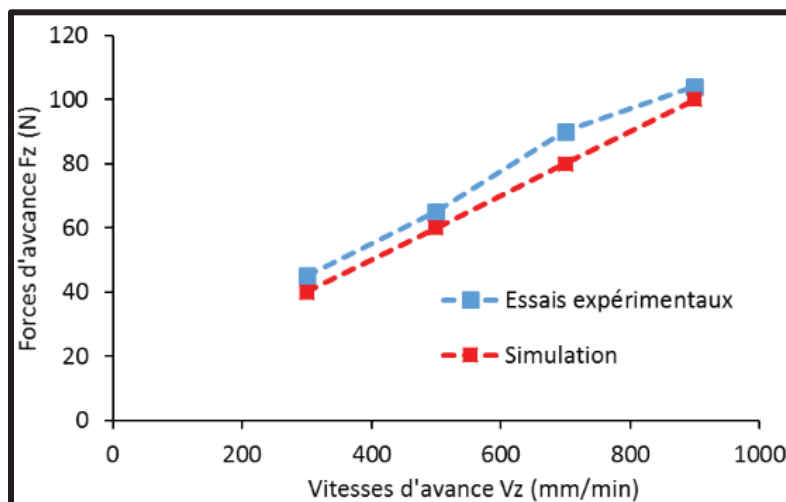


Figure 1.9 Comparaison entre les résultats de la simulation numérique et les résultats expérimentaux pour les efforts d'avance F_z en fonction de la vitesse d'avance

Tirée de Zenia (2017)

1.3.2 Les défauts issus de l'usinage

L'usinage des matériaux composites peut engendrer divers types d'endommagements aux niveaux mécanique et thermique. Sur le plan mécanique, les charges imposées par l'outil de coupe peuvent entraîner des dégradations telles que des délaminations, des éclats ou des fractures des fibres de renfort, affaiblissant ainsi la structure du composite. Ces altérations mécaniques peuvent compromettre la résistance globale du matériau et influencer négativement ses performances structurales. Parallèlement, du point de vue thermique, les températures générées pendant l'usinage peuvent induire des déformations thermiques, des changements dans la structure moléculaire de la matrice polymère, voire des phénomènes de combustion locale (Y. Wang et al., 2022) (Zhang, Zhang, Nie, Yang, & Ding, 2021).

Il est recommandé d'utiliser des outils en carbure cémenté et de préférence en diamant pour l'usinage des composites GFRP en raison de la dureté et de l'abrasivité élevées des fibres de verre. Les outils en diamant polycristallin sont préférés pour les composants GFRP avec une forte teneur en fibres de verre (-60%). En ce qui concerne l'usinage des composites CFRP, il peut causer des problèmes tels que l'usure de l'outil et la délamination (Hou & Komanduri, 1997). La figure 1.10 présente les différents types de délaminage après usinage (J. Y. Sheikh-Ahmad, Almaskari, & Hafeez, 2019)

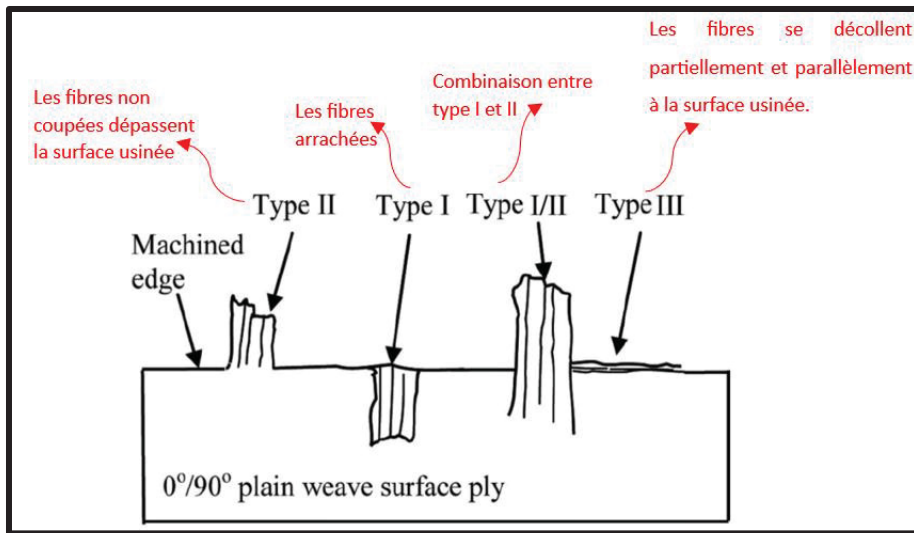


Figure 1.10 Les différents types de délaminage après usinage

Tirée de El-Ghaoui (2019)

L'arrachage est une autre irrégularité en surface qui se définit par la rupture des fibres sous la zone usinée, comme l'a souligné (El-Ghaoui, Chatelain, & Ouellet-Plamondon, 2019a). La figure 1.11 illustre ce type d'endommagement, où le processus de rupture débute par une décohésion des fibres, se propage sous la surface, et aboutit à la rupture des fibres par fléchissement (Nguyen-Dinh, Hejjaji, Zitoune, Bouvet, & Crouzeix, 2018).

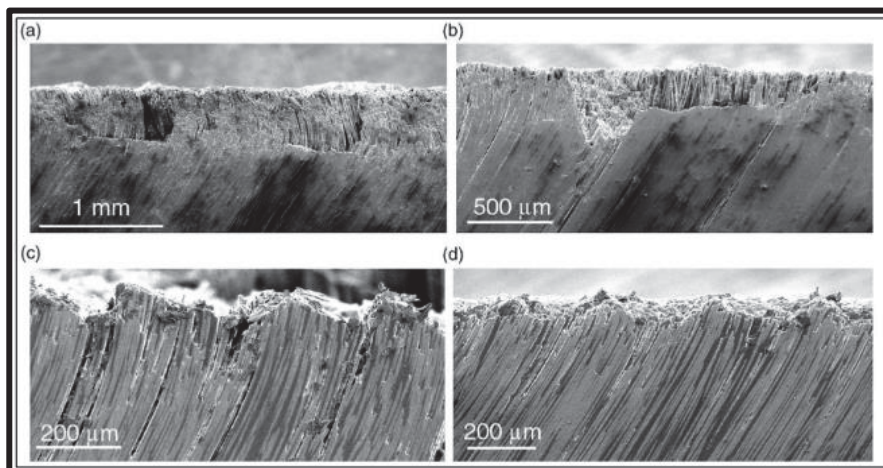


Figure 1.11 Arrachement de fibres et fissuration

Tirée de Nguyen-Dinh et al (2018)

Lors de l'usinage, les températures élevées produites pendant la coupe peuvent engendrer plusieurs complications, incluant des déformations thermiques, des altérations de la structure moléculaire des matériaux, et même des risques de dégradation thermique. Par ailleurs, ces températures élevées peuvent également entraîner des risques de brûlures (figure 1.12) selon le type de matériau usiné (Slamani, Chatelain, & Hamedanianpour, 2019).

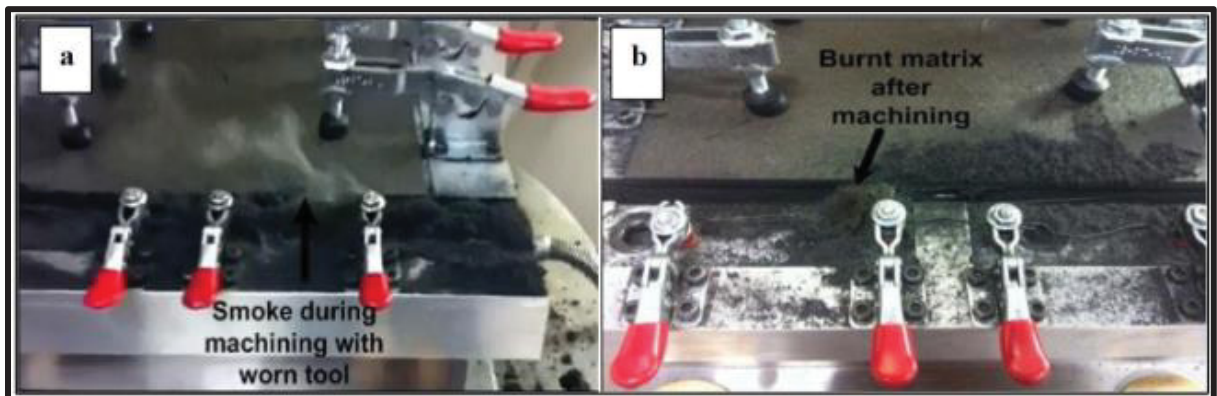


Figure 1.12 La photo de fumée et matrice brûlée durant l'usinage des CFRP
Extraite de Slamani et al (2019)

1.3.2.1 Défauts en perçage de composites

Lorsqu'on aborde les défauts de perçage dans les matériaux composites à fibres longues, il est essentiel de comprendre la complexité inhérente à ce processus. Les défauts résultent d'une combinaison de facteurs, notamment l'anisotropie du matériau, la géométrie de l'outil utilisé et les conditions de coupe. Comme l'ont souligné Thierry Stéphane TCHOUTENG en 2020, trois types de défauts se manifestent en fonction de la position de l'outil par rapport à l'échantillon composite (Tchouteng, 2020).

- Les défauts d'entrée de trou
- Les défauts sur la paroi du trou
- Les défauts de sortie de trou

Ces imperfections peuvent compromettre la résistance mécanique des stratifiés, notamment lorsqu'ils sont soumis à des contraintes. En effet, une représentation schématique de ces défauts

est présentée dans la figure 1.13 (Gohorianu, 2008), mettant en évidence l'importance de leur prise en compte lors de la conception et de la fabrication de composants en composites.

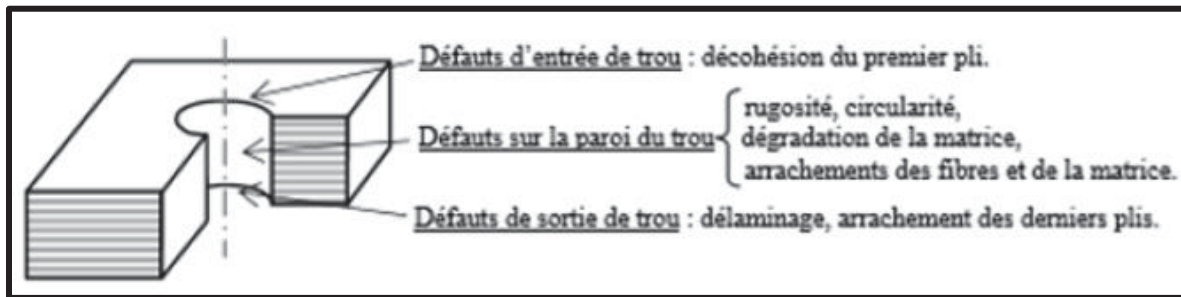


Figure 1.13 Défauts de perçage
Tirée de Gohorianu (2008)

la figure 1.14 présente le défaut à l'entrée et à la sortie de trou : la délamination (Zenia, 2017).

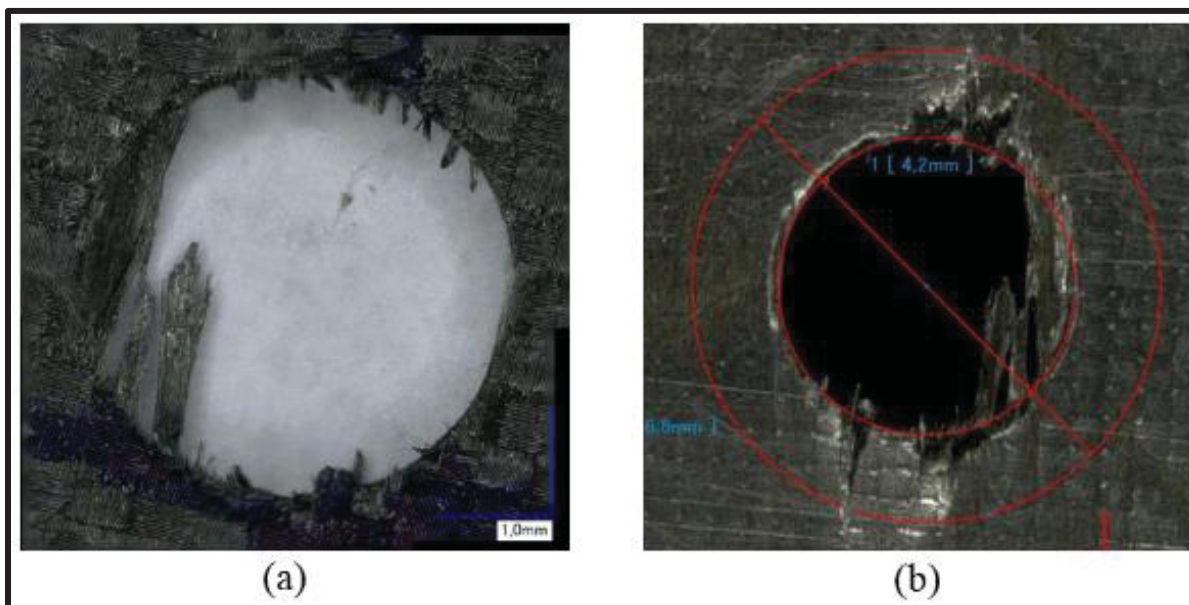


Figure 1.14 Délaminage en (a) entrée de trou et en (b) sortie de trou
Tirée de Zenia (2017)

Le défaut de la délamination s'accroît avec une augmentation de la vitesse d'avance. Cette constatation a été corroborée à la fois par des simulations numériques, notamment les résultats de la simulation 3D, et par des données expérimentales. La figure 1.15 illustre la corrélation étroite entre ces résultats, en présentant l'évaluation du délaminage en sortie de trou en fonction de la vitesse d'avance.

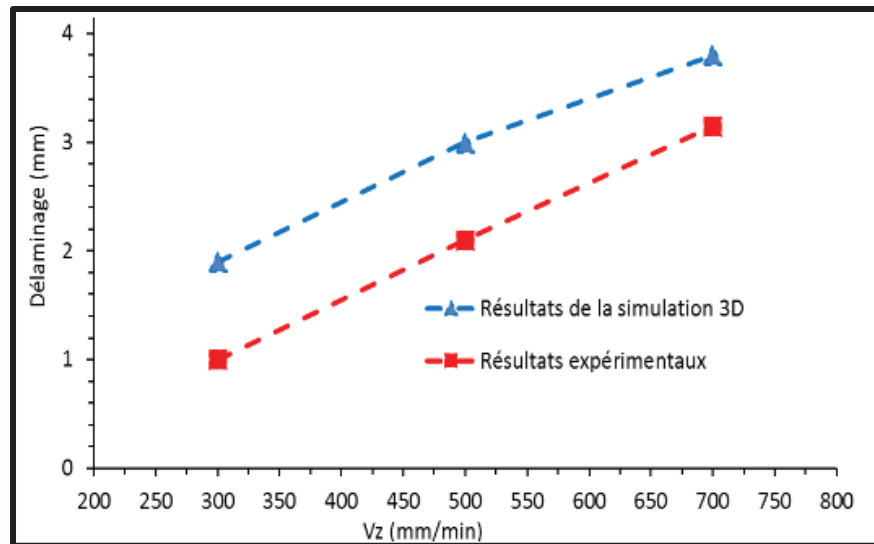


Figure 1.15 L'influence de vitesse de coupe sur le délaminage en sortie de trou
Tirée de Zenia (2017)

De plus, il existe plusieurs autres défauts qui ont été observés, notamment des cavités, des arrachements de fibres, des fissurations de la matrice et du délaminage. La figure 1.16 présente une image MEB réalisée sur un échantillon poli du composite CFRP à couches multiples $[-45^\circ, 0_2^\circ, -45^\circ]$ à l'aide d'un microscope électronique.

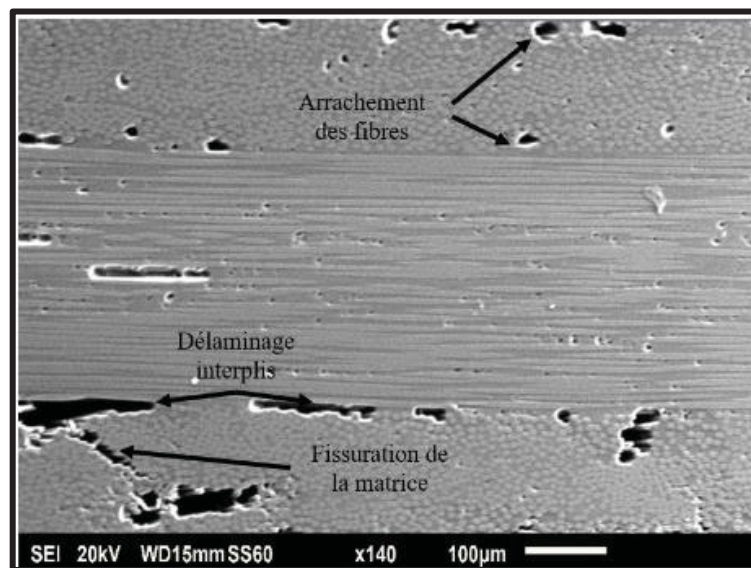


Figure 1.16 Image MEB réalisée sur un échantillon poli du composite CFRP à couches multiples $[-45^\circ, 0_2^\circ, -45^\circ]$
Tirée de Zenia (2017)

Dans leur étude de 2013 (Hamedanianpour & Chatelain, 2013) ont réalisé trois tests à des conditions d'usinage optimales : des vitesses de coupe comprises entre 200 et 400 m/min et des vitesses d'avance comprises entre 1524 et 4064 mm/min, en utilisant un outil de coupe en carbure revêtu de CVD à six cannelures droites. Le matériau testé était composé de 24 plis avec une fraction volumique de fibres de 64% et une séquence d'empilement de plis de $[90^\circ, -45^\circ, 45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 45^\circ, 90^\circ]$. Les trois tests ont considéré des états d'usure d'outil différents.

La figure 1.17 présente les résultats du troisième test, réalisé avec un outil dont l'usure maximale de flanc était de 0,30 mm, correspondant à une force de coupe de 757 N. Les résultats montrent une diminution de la rugosité de surface à mesure que la longueur de coupe augmente. Ce phénomène confirme que la chaleur générée provoque un effet indésirable de tartinage sur la surface usinée. À titre de comparaison, le premier échantillon a été usiné avec un outil ayant une usure maximale de flanc de 0,08 mm (force de coupe de 152 N), tandis que le second a été usiné avec un outil présentant une usure maximale de flanc de 0,23 mm (force de coupe de 691 N). La rugosité n'est donc pas un bon indicateur pour caractériser l'usinabilité des composites, contrairement à l'usinage des métaux.

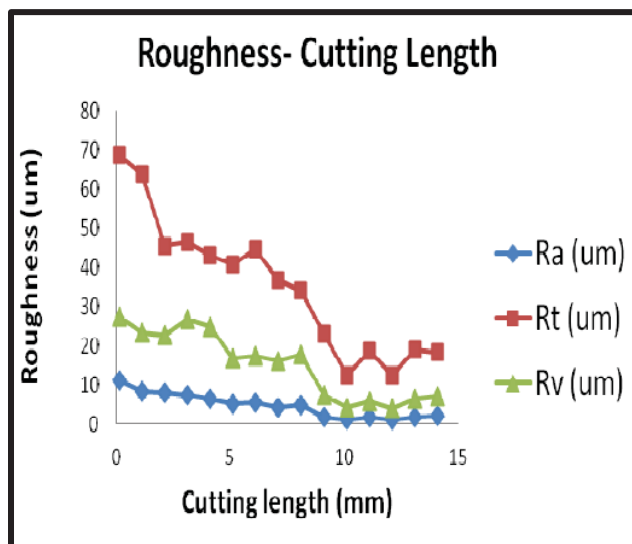


Figure 1.17 L'évolution de la surface rugueuse en fonction de la longueur de coupe dans le Test 3 (lors du fraisage ascendant dans le pli à -45°)
Tirée de Hamedanianpour et Chatelain (2013)

Dans l'étude sur le rainurage d'un stratifié CFRP de séquence $[(45^\circ / 0^\circ / 135^\circ / 90^\circ)_5]_{s40}$, (El-Hofy et al., 2011) ont constaté que l'utilisation d'un outil usé engendre des forces de coupe élevées qui ramollissent la matrice, provoquant une réorientation des fibres à 45° et entraînant une délamination de surface. Cette étude est faite avec une vitesse de broche maximale de 20000 rpm à 15 kW d'un centre d'usinage CNC Matsuura FX 5 à 3 axes, qui été équipé avec un système d'extraction de poussière et un système de refroidissement, l'air de refroidissement vaut 8°C et la pression de sortie de 0,4 bar. Dans ce cas, la vitesse d'avance est le facteur le plus significatif pour l'intégrité de la surface usinée, avec une contribution de 57,5% selon l'analyse de variance (ANOVA), comparativement à d'autres facteurs tels que la vitesse de coupe, le matériau de l'outil (WC et PCD), et la température. Pour l'optimisation des vitesses de coupe et d'avance pour améliorer la surface usinée, il convient de noter que cela dépend de l'opération effectuée. Bien que pour une opération de rainurage, une combinaison de vitesses élevées peut être bénéfique, pour les opérations de détournage examinées par (J. Sheikh-Ahmad, Urban, & Cheraghi, 2012), une combinaison de vitesse d'avance élevée et une faible vitesse de coupe améliore la rugosité de surface dans la direction longitudinale comme présenté à la figure 1.18.

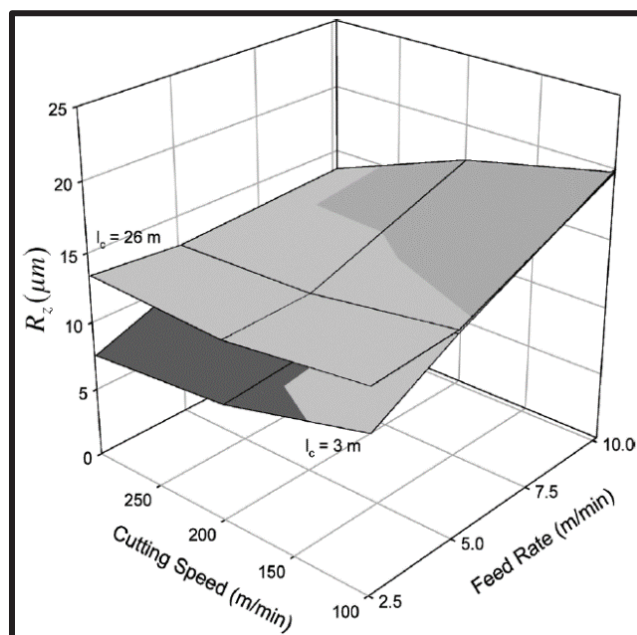


Figure 1.18 Effet des paramètres de processus sur la rugosité de surface dans la direction longitudinale

Tirée de J. Sheikh-Ahmad et al (2012)

En fraisage, il est connu que la coupe perpendiculaire aux fibres produit une surface recouverte d'une fine couche de matériau de matrice, tandis que l'usinage parallèle aux fibres entraîne souvent une fissure devant la pointe de l'outil. En utilisant l'usinage orthogonal avec des variations de l'angle de coupe de l'outil, de l'angle de dépouille et de la profondeur de coupe, des défauts tels que la délamination, la fracture de la matrice ou la rupture de l'interface matrice-fibre peuvent survenir si l'angle d'usinage est de 0° par rapport à l'orientation des fibres. Des problèmes de qualité de surface peuvent également se produire à des angles de 30° et 60° , tandis qu'une fracture interfaciale peut survenir à un angle de 90° . Pour éviter ces problèmes, une solution efficace consiste à opter pour l'usinage à un angle de 135° (Nele et al., 2021). La figure 1.19 (Nele et al., 2021) présente le mécanisme de coupe pour les composites FRP.

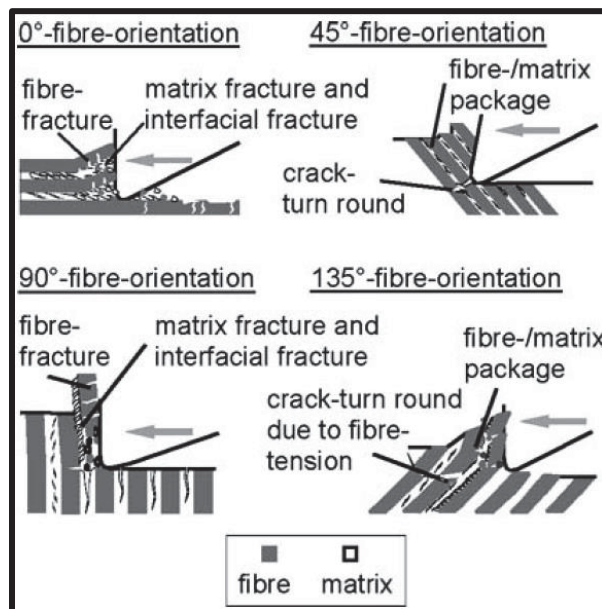


Figure 1.19 Mécanismes de coupe pour les composites FRP

Tirée de Nele et al (2021)

En outre, les résultats de la recherche de (Kumar & Singh, 2020) mettent en évidence que l'orientation des fibres à un angle de 45° entraîne une faible résistance à la traction en raison du décollement de l'interface entre les fibres et la matrice. De même, avec une orientation des fibres à 60° , la défaillance se produit également par décollement et fragmentation des fibres, ce qui entraîne une diminution de la résistance. En revanche, les composites dont les fibres

sont orientées à 90° présentent une résistance à la traction maximale, car la rupture commence par la fracturation des fibres, suivie de celle de la matrice comme montre la figure 1.20.

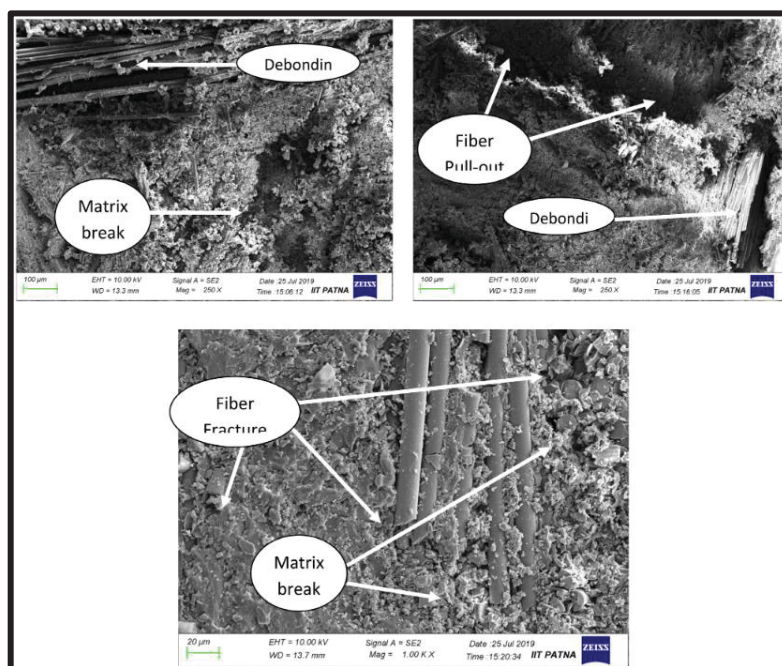


Figure 1.20 Surface de fracture en traction des composites renforcés avec une orientation des fibres de (a) 45° , (b) 60° et (c) 90°
Tirée de Kumar & Singh (2020)

Dans leur étude, (Lopresto, Caggiano, & Teti, 2016) avaient pour objectif d'étudier le mécanisme de formation des copeaux pour les composites PRF (Polymère Renforcé de Fibres) afin d'obtenir une qualité adéquate des pièces composites. Ils souhaitaient également vérifier l'effet de la vitesse de coupe sur la conception de l'outil lors de découpages à des vitesses élevées, notamment à $v = 460$ mm/min et $v = 2200$ mm/min. La formation des copeaux est influencée par l'angle de coupe de l'outil. Les auteurs ont observé plusieurs résultats selon l'orientation des fibres. À titre d'illustration, l'orientation des fibres et l'angle de coupe de 0° provoque une bonne qualité de surface après la coupe (couper une plus grande quantité de fibres ce qui produit un déplacement hors du plan plus faible). Ainsi, pour l'optimisation du processus d'usinage, afin de surveiller et de contrôler la qualité de la coupe et la durée de vie de l'outil, les chercheurs ont observé une corrélation entre le mécanisme de formation des copeaux et la force de coupe, même lorsque l'angle d'orientation des fibres est modifié à 30° .

Cette corrélation permet de réduire l'usure de l'outil. Cela indique qu'il existe une relation entre la force de coupe et la qualité de la pièce fabriquée.

En outre, l'application d'une vibration ultrasonore lors de l'usinage de CFRP avec un outil en PCD a permis de réduire la force de coupe, la formation de bavures et d'améliorer la qualité de surface obtenue (Nele et al., 2021). La figure 1.21 présente une observation microscopique de la coupe d'une surface avec une orientation de fibre de 0° en usinage conventionnel et en usinage vibratoire.

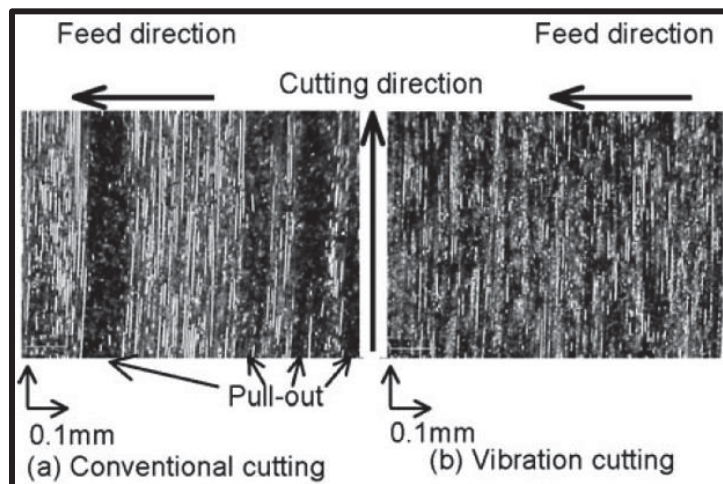


Figure 1.21 Observation microscopique d'une surface en usinage conventionnel et usinage vibratoire
Tirée de Nele et al (2021)

1.3.3 Influence des additifs sur la qualité d'une surface usinée

L'introduction d'additifs dans un matériau joue un rôle déterminant dans la modulation de sa rugosité de surface. Le pourcentage d'additifs incorporés peut directement influencer la texture finale du matériau, impactant ainsi sa résistance à l'usure, sa capacité de dissipation thermique, et sa conformité à des critères esthétiques spécifiques. En ajustant avec précision le pourcentage des additifs, des résultats significatifs peuvent être obtenus.

Une illustration de cette influence se retrouve dans une étude où l'incorporation d'une concentration de 1% de graphène dans le polymère renforcé de fibres de verre a conduit à une

réduction de la rugosité de surface de 14,12% par rapport à l'époxy pur (El-Ghaoui, Chatelain, & Ouellet-Plamondon, 2019b). La figure 1.22 met en évidence l'effet de l'ajout de graphène sur la qualité de surface à la suite du détournage d'un laminé de GFRP.

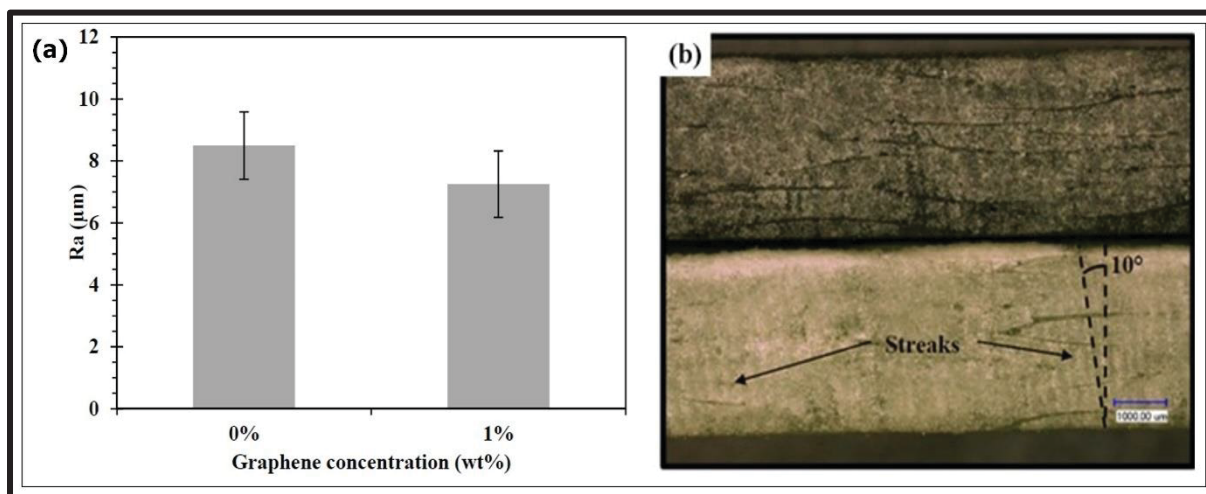


Figure 1.22 (a) L'effet de l'ajout de graphène sur la qualité de surface, et (b) comparaison entre les résultats obtenus entre les deux surfaces usinées
Tirée de El-Ghaoui, Chatelain, & Ouellet-Plamondon (2019)

Il a été montré que le détournage d'une surface en GFRP sans graphène engendre des traînées, tandis que l'incorporation de 1% de cet additif peut réduire ce défaut. La figure 1.22 (b) présente une comparaison entre les résultats obtenus entre les deux surfaces usinées (El-Ghaoui, Chatelain, & Ouellet-Plamondon, 2019b).

Dans le cadre de ses recherches sur l'influence des additifs sur l'usinabilité des composites GFRP, (Togue, 2019) a exploré l'incorporation d'additifs sous forme de microparticules, telles que l'argile, la cire et un agent mouillant, dans une matrice époxy d'un composite de fibres de verre (GFRP) pendant la phase de mise en forme. L'objectif était d'évaluer leur impact sur la qualité des surfaces usinées. Après l'opération de détournage du mélange combiné avec les trois additifs, une amélioration significative d'une valeur de 73,1% de rugosité de surface (Ra) a été observée. La figure 1.23 montre les différents résultats obtenus pour différentes stratifiées.

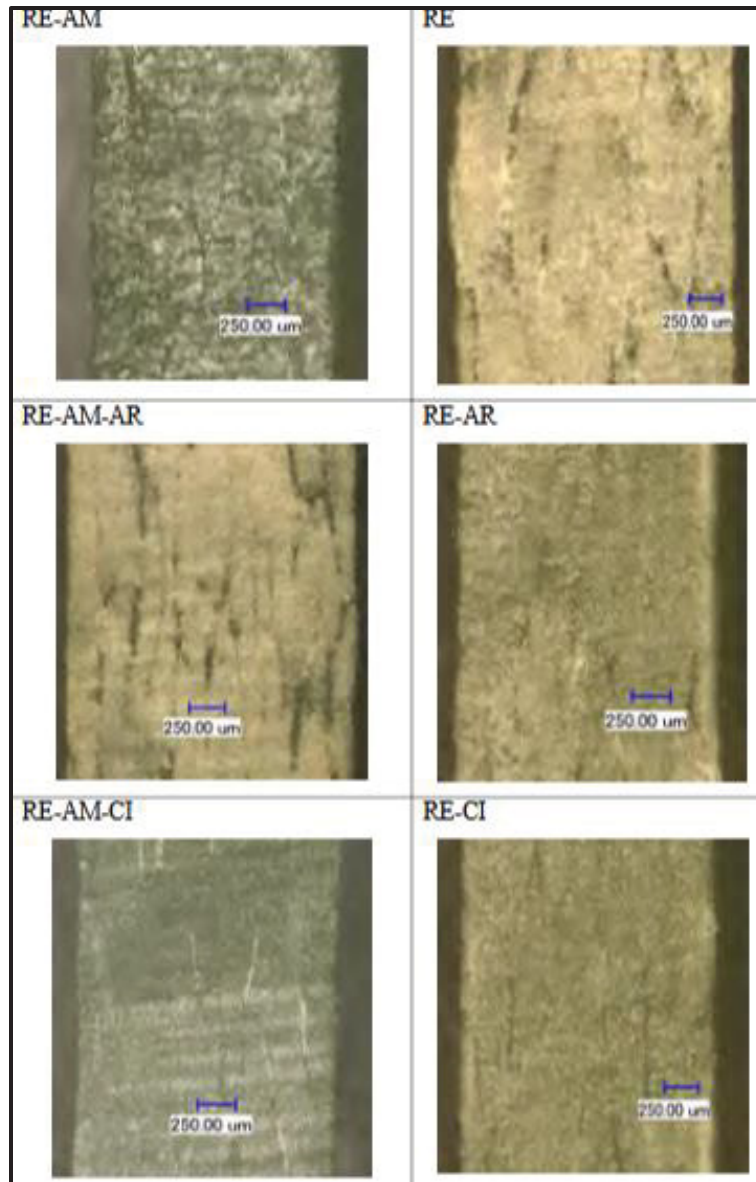


Figure 1.23 États de surface des différents stratifiés sur microscope (250 µm/div)
Tirée de Togue (2019)

Dans la figure 1.24, une confirmation est apportée quant à l'efficacité de la combinaison d'agent mouillant, d'argile et de cire, démontrant une réduction significative de la rugosité et, par conséquent, une amélioration notable de la qualité de surface.

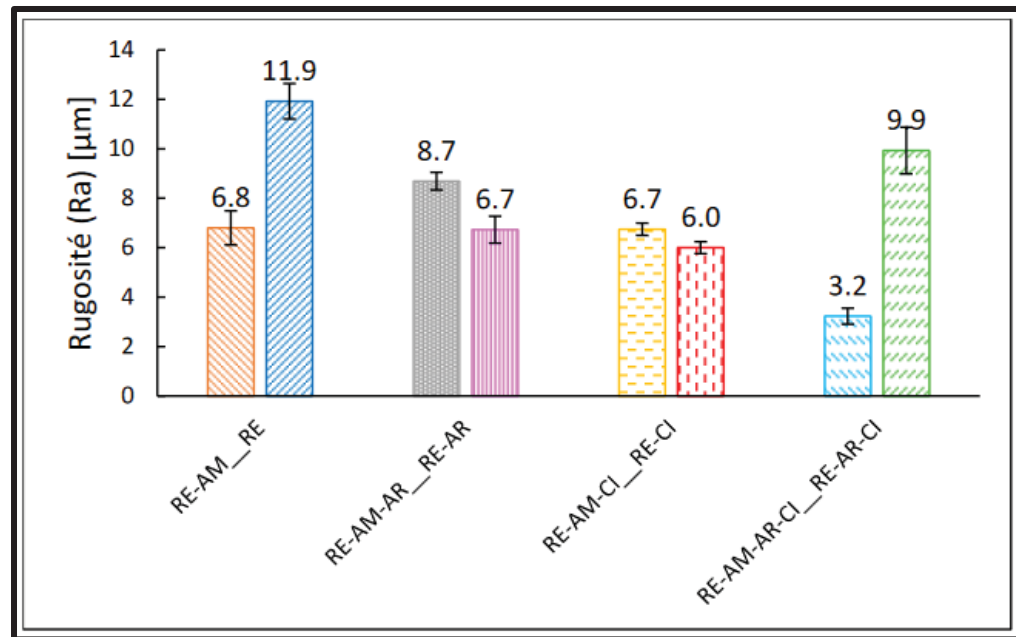


Figure 1.24 L'effet de l'AM sur la rugosité des plaques

Tirée de Togue (2019)

1.3.4 Influence des additifs sur les forces de coupe

L'ajout d'additifs à un matériau peut exercer une influence significative sur ses propriétés mécaniques, impactant notamment les forces impliquées dans divers processus (figure 1.25). Ces additifs, tels que des renforts ou des agents de modification, ont le potentiel de modifier les interactions moléculaires et les caractéristiques intrinsèques du matériau, entraînant ainsi des variations dans les forces appliquées. Par exemple, (El-Ghaoui, Chatelain, Ouellet-Plamondon, & Mathieu, 2019) indiquent que les forces d'avance baissent de 60,8% à la suite de l'ajout de 1% de graphène.

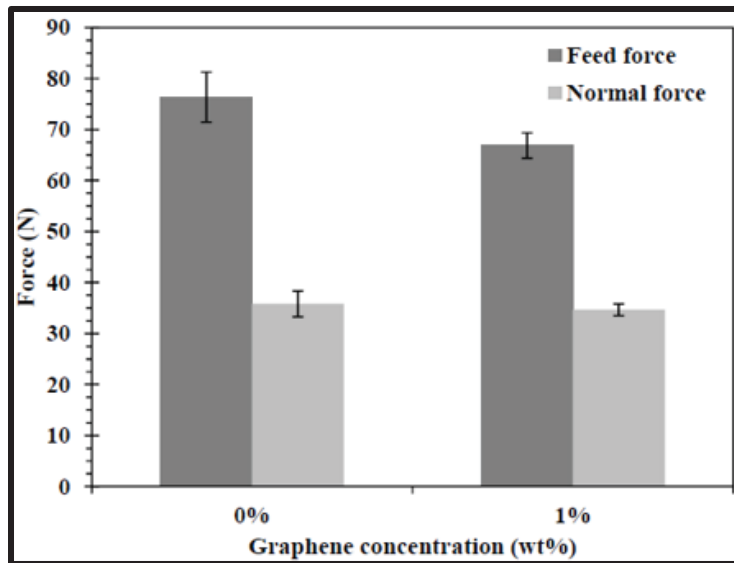


Figure 1.25 Influence de concentration de Graphene sur la force
Tirée de El-Ghaoui, Chatelain, & Ouellet-Plamondon (2019)

De plus, Mathieu et al. (2022) ont montré que les forces d'avance diminuent lors du fraisage du CFRP, atteignant 122 N avec une concentration de 0,25 % en poids de graphène. La concentration la plus élevée (3 % en poids) conduit aux forces d'avance les plus faibles, soit 85 N. En revanche, la force normale augmente avec l'ajout de graphène, passant de 3 N à 16 N, ce qui reflète une résistance accrue du matériau (figure 1.26).

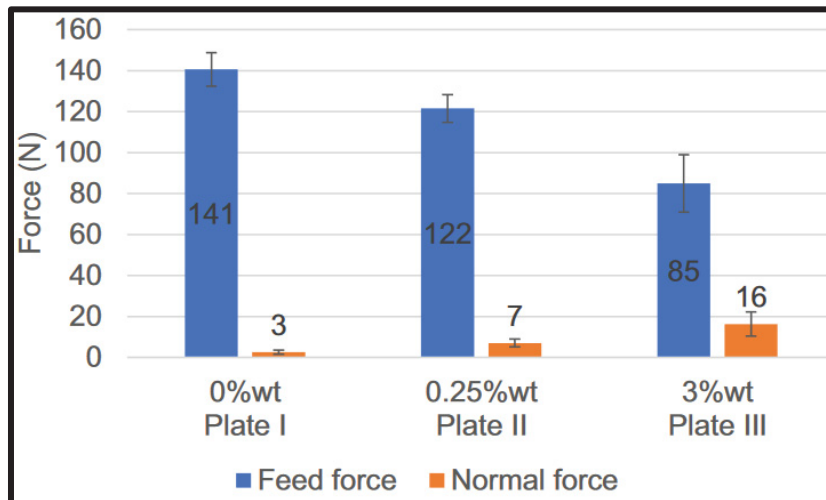


Figure 1.26 L'effet de concentration sur la force d'avance
Tirée de Mathieu et al. (2022)

1.3.5 Influence des additifs sur la température de coupe

L'exploration de l'influence des additifs sur la température dans les matériaux constitue un domaine essentiel de la recherche, car les additifs peuvent significativement moduler les réponses thermiques des matériaux dans divers contextes d'application. Les additifs, qu'ils soient des conducteurs thermiques, des isolants ou des régulateurs thermiques, jouent un rôle crucial dans la gestion et la modification des propriétés thermiques des matériaux. L'étude de Mathieu analyse l'effet des additifs de graphène sur la température de coupe en détournage de CFRP. La température est enregistrée par thermocouples fixés aux arêtes d'outil mais également à l'aide d'une caméra thermique pour fins de comparaison. Il est observé que les températures enregistrées dans la zone de thermocouples augmentent significativement avec le pourcentage de graphène (figure 1.27). Pour un matériau nano-composite (sans fibre), la température de coupe augmente plus légèrement avec la concentration de graphène que ce soit avec la caméra thermique ou avec les thermocouples. Fait à noter, la caméra thermique surestime la température de l'outil de coupe en comparaison avec les thermocouples (Mathieu et al., 2022).

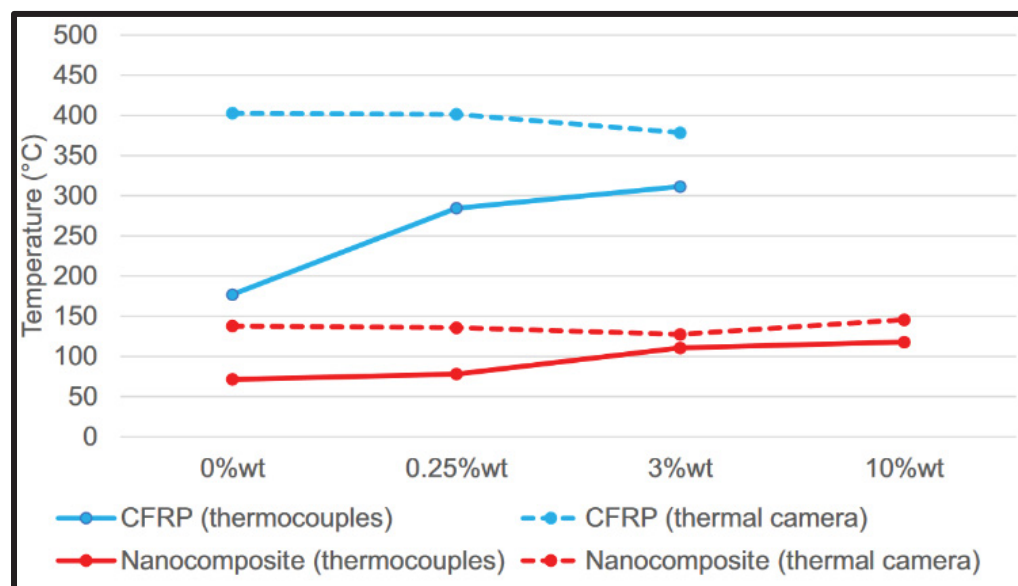


Figure 1.27 Influence de graphène sur la température

Tirée de Mathieu et al (2022)

De plus, (El-Ghaoui, Chatelain, Ouellet-Plamondon, et al., 2019) observent que le détournage des plaques en GFRP avec graphène provoque une diminution de la température de coupe par rapport à l'usinage des plaques sans graphène. Donc on conclut que l'augmentation de 1 % de graphène contribue à une diminution de la température de coupe comme mentionné dans la figure 1.28.

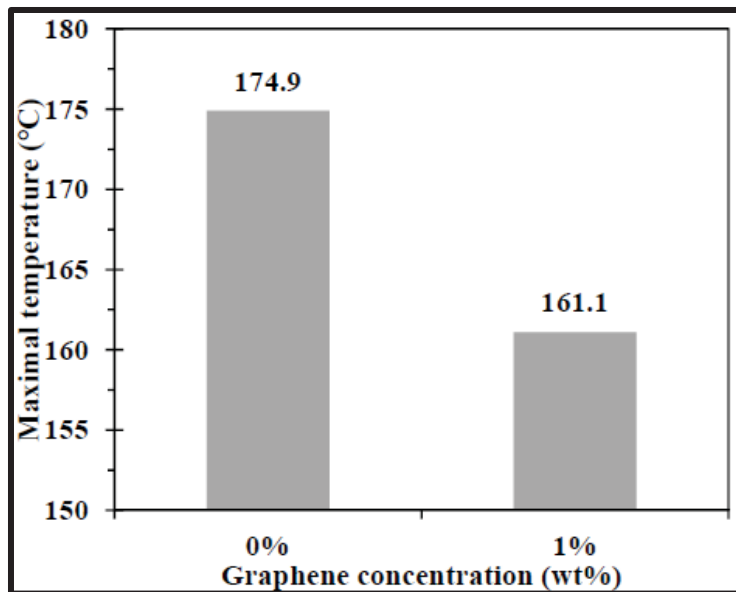


Figure 1.28 L'effet du graphène sur la température

Tirée de El-Ghaoui, Chatelain et Ouellet- Plamondon (2019)

1.4 Résumé

Après avoir étudié les différents aspects de l'usinage des matériaux composites renforcés par du verre ou du carbone, il convient de souligner que :

- En améliorant les techniques d'usinage et la constitution des matériaux composites, on peut obtenir une résistance accrue des matériaux, réduire leur coût ainsi que celui de la fabrication, et réduire l'usure des outils de coupe
- La sélection de matériaux d'outils plus résistants, tels que le revêtement en Polycristalline Diamond (PCD), permet d'augmenter la durée de vie des outils tout en

les protégeant contre l'usure thermique. En outre, cette option offre des avantages économiques en produisant des pièces usinées de haute qualité.

- L'usinage peut endommager la surface de la pièce en provoquant des fissures dans la matrice, l'arrachage des fibres et la formation de trous vides. Il est démontré qu'une faible avance et une augmentation de la vitesse de coupe peuvent prolonger la durée de vie de l'outil.
- Les forces moyennes de coupe et l'usure de l'outil augmentaient avec l'augmentation de la longueur de coupe
- Le meilleur état de surface a été trouvé sur les plis où les fibres étaient parallèles à la direction de coupe de l'outil (0°).
- Une augmentation de la vitesse d'avance entraîne une diminution de la chaleur conduite à la pièce, ce qui entraîne une production de copeaux plus gros qui transportent plus de chaleur loin de la zone de coupe.
- L'ajout de Graphene sur le GFRP pendant l'usinage permet d'augmenter la qualité de surface et de diminuer la température de coupe et les forces.
- L'ajout de cire, l'argile et d'agent mouillant provoque une amélioration de la qualité des surfaces usinées, une diminution des efforts et de la température de coupe.

CHAPITRE 2

Objectif et méthodologie

2.1 Objectif de la recherche

La revue de littérature a présenté le graphène comme matériau qui se distingue par sa conductivité électrique et thermique exceptionnelle, ce qui en fait une option de choix pour renforcer les propriétés des composites CFRP et GFRP (M. Wang, Yan, & Ma, 2012). Dans le cas de la cire, la littérature mentionne qu'elle agit comme un agent économique de renforcement de l'adhérence, favorisant ainsi la liaison entre le graphène et la matrice polymère (Xu, Cao, Xue, Li, & Cai, 2018). L'association du graphène et de la cire dans une matrice polymère permet d'obtenir potentiellement un matériau composite présentant une gamme unique de propriétés telles que la résistance mécanique, la conductivité électrique, la conductivité thermique et la résistance à l'humidité (M. Wang et al., 2012). Ces propriétés peuvent être ajustées en fonction des proportions relatives de graphène et de cire dans le composite (Xu et al., 2018) (Charfi, 2020). La littérature a également montré l'effet positif de ces additifs pour diminuer la température et les efforts de coupe dans le cas du détournage des composites GFRP et CFRP (El-Ghaoui, Chatelain, & Ouellet-Plamondon, 2019). À notre connaissance, aucune étude ne concerne l'influence de ces additifs en perçage des composites.

L'objectif de cette recherche est d'analyser l'influence des additifs de graphène et de cire sur l'usinabilité en perçage des composites GFRP. Différentes concentrations de graphène et de cire feront partie d'un plan d'expérience afin d'analyser leur effet sur les forces et la température de coupe de même que sur la rugosité des surfaces produites suite au perçage. Ce chapitre présente la méthodologie de la recherche consistant en la présentation du plan d'expérience proposé, la description du procédé de fabrication des laminés puis la description des équipements et instruments utilisés pour le perçage et la mesure des réponses.

2.2 Description du plan d'expérience

L'objectif de cette recherche est d'analyser l'impact du graphène et de la cire sur les forces, la température et la rugosité de surface. Un total de trois concentrations pour chaque additif est considéré. Les concentrations pondérales de 0%, 1% et 2% ont été choisies pour la cire alors que les concentrations de 0%, 0,25% et 2% ont été choisies pour le graphène. Le choix de ces valeurs a été fait en référence aux travaux référant à l'étude de l'effet des additifs en détournage des composites (Mathieu et al., 2022). En plus de faire varier la concentration des additifs, les paramètres de coupe ont été intégrés au plan d'expérience. Quatre niveaux ont été définis pour ces paramètres, comme présenté dans le tableau 2.1. Les pourcentages de cire et de graphène, ayant chacun trois niveaux, nécessitent la fabrication de 9 plaques aux concentrations différentes pour réaliser les 16 essais requis par le plan factoriel multi-niveaux. Ce plan permet de déterminer le nombre d'essais nécessaires en fonction des niveaux de chaque facteur d'entrée : la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, qui comptent chacune quatre niveaux. Ainsi, 16 essais sont nécessaires pour analyser l'effet des facteurs sur les réponses étudiées, à savoir la force de coupe, la température et la rugosité.

La figure 2.1 illustre le plan de perçage des trous, où trois répétitions (T1, T2 et T3) sont réalisées pour chaque niveau de chaque facteur, portant le nombre d'essais à 48 par plaque et à un total de 432 essais pour l'ensemble de l'étude. La même trajectoire de perçage a été suivie pour toutes les plaques, y compris la plaque de référence sans additif (0 % de cire et 0 % de graphène), également percée selon les trois répétitions.

Tableau 2.1 Paramètres utilisés pour le perçage des plaques GFRP

Les entrées							
Vitesse de coupe V_c (mm/min)	Vitesse d'avance V_f (mm/tr)	%WT de cire			%WT de graphène		
50	0,02	0	1	2	0	0,25	2
100	0,04	0	1	2	0	0,25	2
150	0,06	0	1	2	0	0,25	2
200	0,08	0	1	2	0	0,25	2

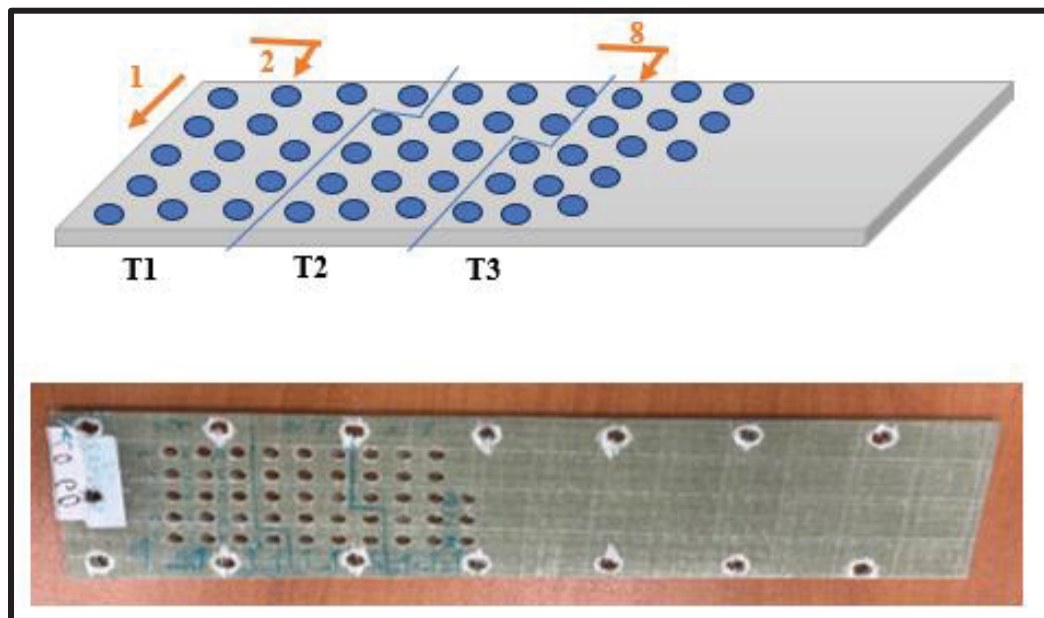


Figure 2.1 Configuration de perçage avec trois répétitions T1, T2 et T3

Le tableau 2.2 qui illustre le plan expérimental en fonction des facteurs et leurs niveaux. Chacun des essais représente une interaction entre les paramètres de coupe et leurs niveaux.

Tableau 2.2 Plan expérimental avec les 3 répétitions

Numéro d'essai	Paramètres de coupe		
	Répétitions	Vitesse de coupe (mm/min)	Vitesse d'avance (mm/tr)
1	1	50	0,02
2	1	50	0,04
3	1	50	0,06
4	1	50	0,08
5	1	100	0,02
6	1	100	0,04
7	1	100	0,06
8	1	100	0,08
9	1	150	0,02
10	1	150	0,04
11	1	150	0,06
12	1	150	0,08
13	1	200	0,02
14	1	200	0,04
15	1	200	0,06
16	1	200	0,08
17	2	50	0,02
18	2	50	0,04
19	2	50	0,06
20	2	50	0,08
21	2	100	0,02
22	2	100	0,04
23	2	100	0,06
24	2	100	0,08
25	2	150	0,02
26	2	150	0,04
27	2	150	0,06
28	2	150	0,08
29	2	200	0,02
30	2	200	0,04
31	2	200	0,06
32	2	200	0,08
33	3	50	0,02
34	3	50	0,04
35	3	50	0,06
36	3	50	0,08

Numéro d'essai	Paramètres de coupe		
	Répétitions	Vitesse de coupe (mm/min)	Vitesse d'avance (mm/tr)
37	3	100	0,02
38	3	100	0,04
39	3	100	0,06
40	3	100	0,08
41	3	150	0,02
42	3	150	0,04
43	3	150	0,06
44	3	150	0,08
45	3	200	0,02
46	3	200	0,04
47	3	200	0,06
48	3	200	0,08

Les forces de coupe dans chaque direction ont été mesurées à l'aide d'une table dynamométrique Kistler pendant le perçage (voir détails dans la section suivante). Pour réduire l'instabilité du signal brut, la moyenne a été calculée en excluant les données des phases initiale et finale des essais, où les régimes transitoires et les vibrations sont plus prononcés lors de l'entrée et de la sortie de l'outil. Un programme développé sous Matlab (annexe 1) a permis d'automatiser ce calcul, comme illustré dans le diagramme de la figure 2.3. À titre d'exemple, la figure 2.2 présente le signal de force de coupe enregistré pour une vitesse de 150 mm/min et une avance de 0,06 mm/rev, pour chacune des plaques étudiées.

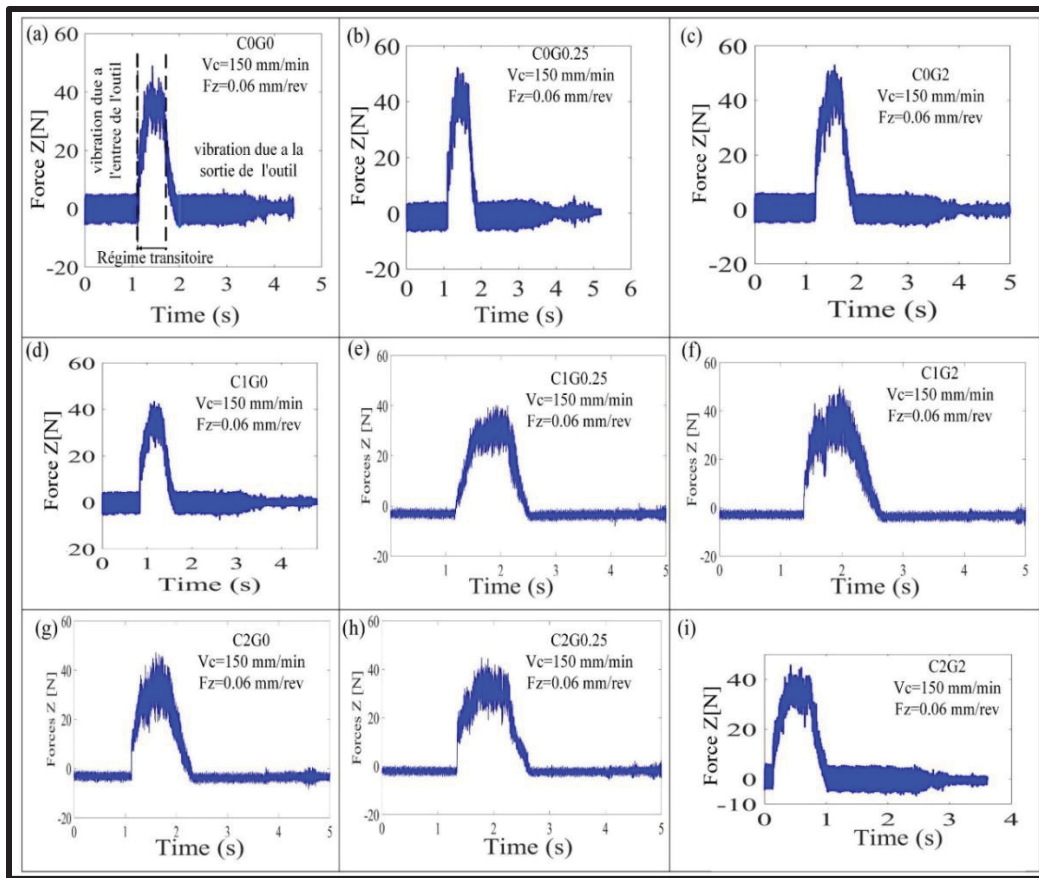


Figure 2.2 Signal brut de la force de poussée

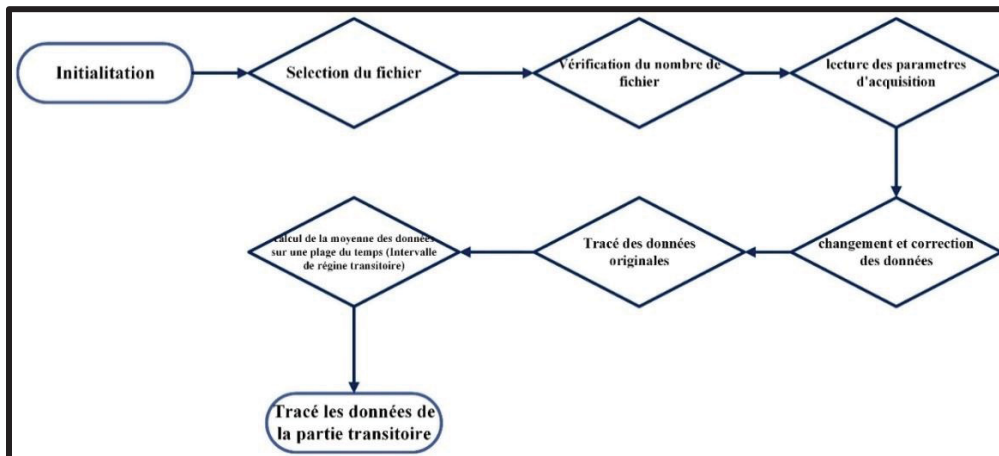


Figure 2.3 Diagramme explicatif pour la recherche de la moyenne en régime permanent transitoire

2.3 Procédé de fabrication des laminés GFRP

L'objectif de cette section est la description de toutes les étapes de fabrication des plaques échantillons en GFRP. La première étape consiste à doser le mélange, suivi de l'application de la méthode de moulage par contact pour préparer les différents échantillons contenant des fibres de verre.

2.3.1 Dosage du mélange

Les plaques en GFRP contenant différentes concentrations de graphène et de cire ont été fabriquées selon un processus de mélange standardisé. Le graphène noir 0X a été fourni par Nano-Xplore Inc. et la cire Ceraflour 996 a été fournie par BYK USA Inc. Ces particules ont été soigneusement pesées et incorporées dans la résine époxy Marine 820. Les proportions pondérales de graphène et de cire dans les échantillons sont présentées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 Fractions pondérales des échantillons

Numéro d'échantillons	Fraction pondérale de l'échantillon (% en poids)	
	Cire	Graphene
1	0	0
2	0	0,25
3	0	2
4	1	0
5	1	0,25
6	1	2
7	2	0
8	2	0,25
9	2	2

Les proportions relatives du graphène et de la cire ont été évaluées par rapport au poids total du mélange, comprenant l'époxy, le graphène, la cire et le durcisseur. Les calculs des proportions ont été réalisés à l'aide des équations suivantes :

$$W_g = (wt.\%)_g * W_t \quad (2.1)$$

$$W_c = (wt.\%)_c * W_t \quad (2.2)$$

$$W_A = W_g + W_c = W_t * ((wt.\%)_g + (wt.\%)_c) \quad (2.3)$$

$$W_d = 0.18W_{ep} \quad (2.4)$$

$$W_t = W_{ep} + W_A + W_d \quad (2.5)$$

$$WA = \frac{((Wt.\%)_g + (wt.\%)_c) * 1.18W_{ep}}{(1 - ((wt.\%)_g + (wt.\%)_c))} \quad (2.6)$$

Sachant que W_d représente le poids du durcisseur (g), W_g est le pourcentage en poids du graphène, W_c est le pourcentage en poids de la cire, W_{ep} représente le poids de l'époxy (g), W_A est le pourcentage en poids du graphène et de la cire combinés et W_t est le poids total (g).

Un agitateur à cisaillement élevé (Silverson L5M-A, Silverson Machines, Inc., East Longmeadow, MA, USA) a été utilisé pour mélanger, cisailier et homogénéiser mécaniquement les particules de graphène et de cire dans l'époxy. Le processus de mélange a été divisé en six segments. Quatre segments de 2 minutes chacun et deux segments de 3 minutes chacun. Les premiers segments ont commencé à une vitesse de mélange faible de 1500 tours/minute. Ensuite, pour chaque segment consécutif, la vitesse de mélange a été augmentée à 3000 tours/minute, 5000 tours/minute, 7500 tours/minute et 10000 tours/minute. Le tableau 2.4 illustre l'ordre de mélange par cisaillement.

Tableau 2.4 L'ordre de mélange par cisaillement

1500 tours/minute	2 minutes
3000 tours/minute	2 minutes
5000 tours/minute	2 minutes
7500 tours/minute	2 minutes
10000 tours/minute	3 minutes
10000 tours/minute	3 minutes

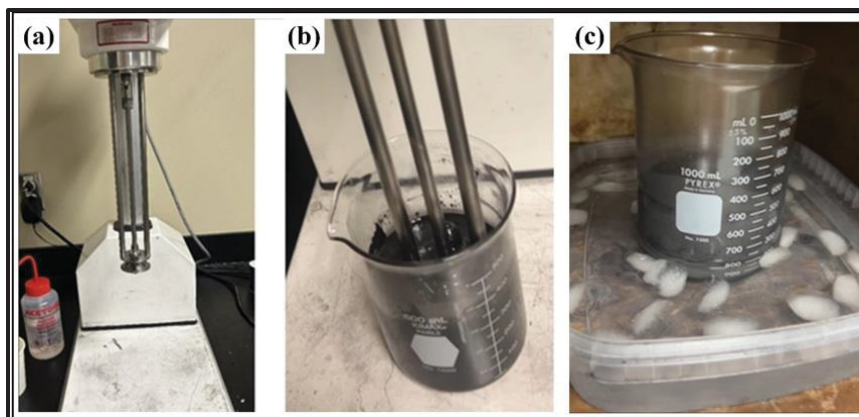


Figure 2.4 (a,b) Mélange d'époxy avec le graphène, la cire et le durcisseur, (c) le mélange dans un bain de glace

Afin de garantir que la température du mélange ne dépasse pas la température de transition vitreuse de l'époxy, un bain de glace a été utilisé pour maintenir la température à un maximum de 30°C (légèrement au-dessus de la température ambiante). Pour les deux derniers segments, la température a été augmentée, ce qui a entraîné une réduction de la viscosité du mélange, facilitant ainsi le processus de dégazage.

Le dégazage a été réalisé deux fois, une première fois juste après l'homogénéisation de toutes les particules dans le mélangeur, puis une seconde fois après l'ajout du durcisseur. La première étape de dégazage revêt une importance capitale en raison de la grande quantité de bulles d'air générées lors du mélange à haut cisaillement. À cet effet, le mélange a été placé sous vide pendant une heure, sous une pression maximale de 29 inHg. Pour la deuxième étape de dégazage, après l'ajout du durcisseur, celui-ci a été réalisé délicatement afin d'éviter l'introduction de bulles d'air. Le mélange a ensuite été mis sous vide pendant 15 minutes. La figure 2.5 illustre le processus de préparation du mélange.

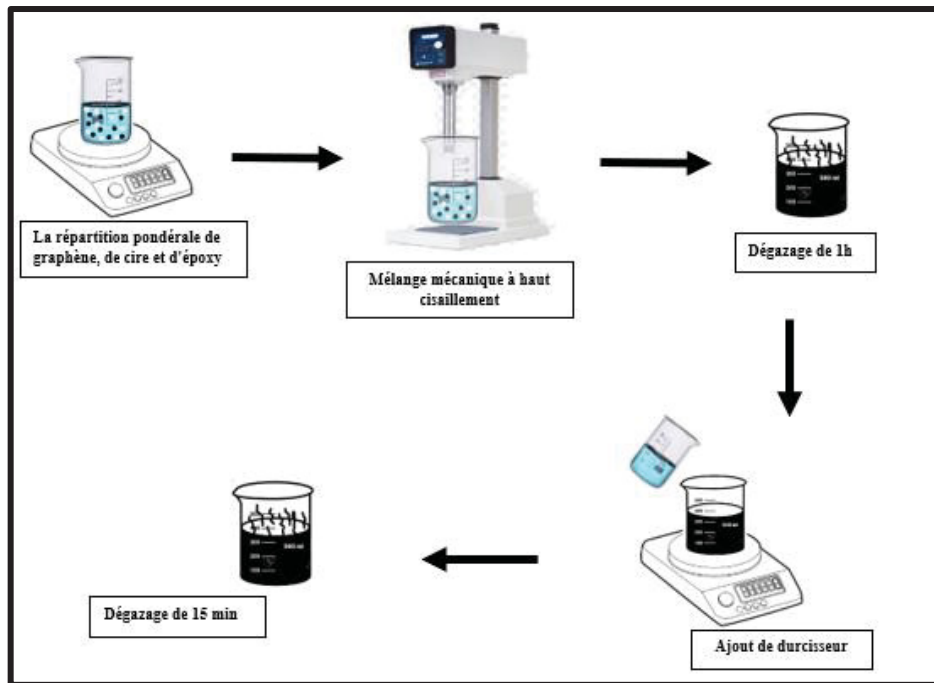


Figure 2.5 Processus de préparation du mélange

2.3.2 Préparation des plaques en fibre de verre

Bien qu'il existe plusieurs méthodes de traitement, la plupart sont soit coûteuses, soit difficiles à mettre en œuvre, notamment en ce qui concerne la distribution homogène des particules d'additifs. Dans ce contexte, le moulage par contact s'est avéré être le choix privilégié pour cette application scientifique, en raison de sa combinaison d'avantages économiques, techniques et pratiques, en faisant ainsi une option très attrayante pour la fabrication des pièces nécessaires.

Pour commencer, le moule est préparé en le revêtant d'une base en feuille plastique lisse. Le moule est ensuite nettoyé à l'eau pour garantir une surface optimale, puis recouvert d'un agent de démoulage pour faciliter le processus de démoulage. Les étapes suivantes impliquent la superposition de couches de fibres. Initialement, une fine quantité de mélange est appliquée sur la surface, puis la première nappe de fibre de verre est placée dessus. Ensuite, une nouvelle quantité de mélange est versée et imprégnée sur toute la surface à l'aide d'un rouleau manuel, permettant d'éliminer les bulles d'air, d'excès de résine et de compacter les plis. Ensuite, une

deuxième nappe de fibre de verre est ajoutée, mais avec une orientation différente à 90 degrés. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'il y ait 16 couches de fibre de verre superposées. Chacune étant soumise aux mêmes étapes rigoureuses pour assurer une cohérence optimale. Ensuite, un sac à vide est appliqué à température ambiante pour améliorer la qualité du composite. Enfin, le modèle est placé dans une presse, soumis à une température de 60 degrés avec l'ajout de cales d'une épaisseur de 5 mm aux quatre coins du moule pour ajuster l'épaisseur finale et achever le processus de durcissement. L'objectif est d'avoir une plaque en fibre de verre de taille 12*12 pouces. Les figures 2.6, 2.7, 2.8 illustrent le procédé complet.



Figure 2.6 Préparation du moule et du matériel à utiliser

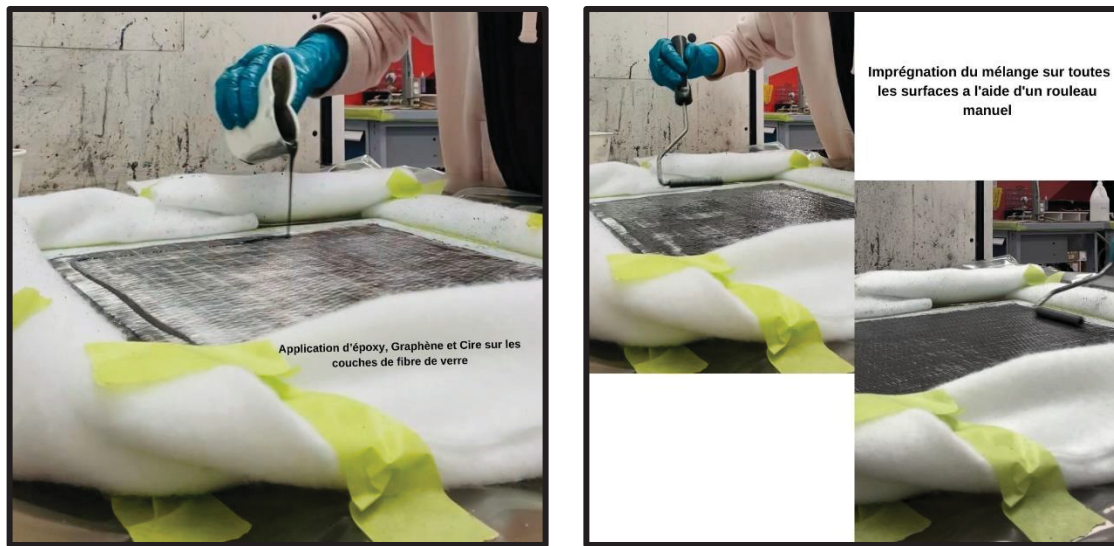


Figure 2.7 L'ajout du mélange et imprégnation avec le rouleau manuel



Figure 2.8 Application du sous-vide et processus de durcissement sous presse

2.3.3 Préparation des échantillons en fibre de verre

Le polissage des échantillons de GFRP (plastique renforcé de fibres de verre) est une étape cruciale pour préparer la surface à une analyse précise. Ce processus permet d'obtenir une surface uniforme et lisse, éliminant les irrégularités et les défauts qui pourraient interférer avec l'observation microscopique. En conséquence, le polissage assure que la porosité de surface,

c'est-à-dire la présence de petits vides ou pores dans le matériau, est révélée avec précision. Cette précision est indispensable pour déterminer comment ces pores sont distribués et quelle est leur taille, ce qui est fondamental pour comprendre leur impact sur les propriétés mécaniques du GFRP, comme sa résistance et sa durabilité.

L'encapsulation d'échantillons est requise afin de procéder au processus de polissage et d'estimer le taux de porosité de chaque plaque. Des sections de dimensions 1*12 pouces ont été découpées à partir de chaque plaque, chacune contenant différents pourcentages de cire et de graphène. Chaque section a été ensuite divisée en six petits échantillons à l'aide d'une scie. Pour le processus de moulage, des moules cylindriques en plastique ont été utilisés, préalablement nettoyés avec un agent de démoulage. Une quantité de 59 g de mélange d'époxy (50g) et de durcisseur (9g) a été préparée. Les petits échantillons ont été placés dans les moules avec le mélange pour chaque plaque de concentration différente. Ensuite, tous les moules ont été mis sous vide à température ambiante pendant 20 minutes pour le dégazage, afin de garantir une solidité optimale des pièces une fois durcies. Après 24h, le démoulage des pièces est fait en fixant les échantillons dans un étau.

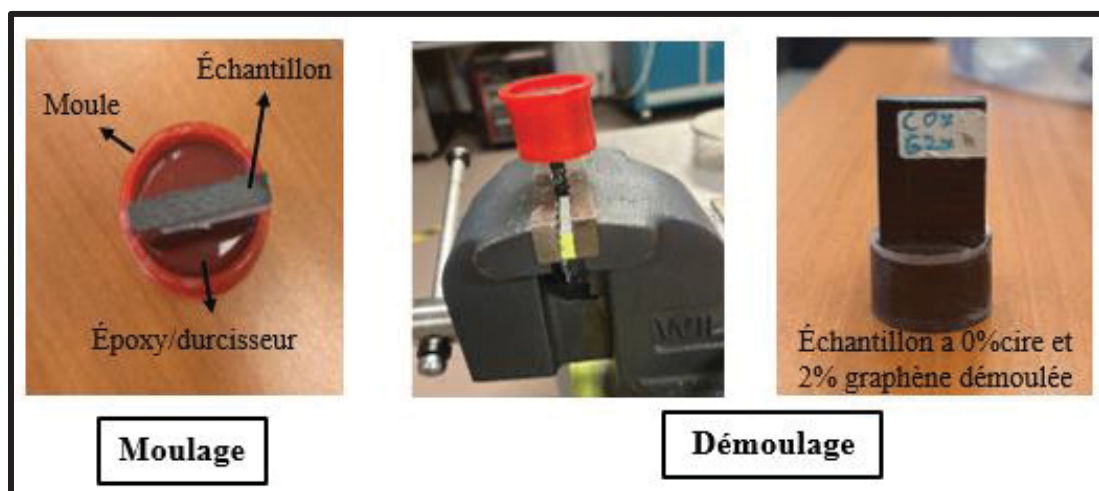


Figure 2.9 Application du sous-vide et processus de durcissement sous presse

2.3.4 Polissage des échantillons moulés

Le processus de polissage revêt une importance primordiale pour améliorer la qualité de surface et déterminer avec précision le taux de porosité. Selon le mémoire de Mohamed Ali Charfi en 2020, une séquence de polissage optimale a été déterminée après de nombreux essais de polissage. L'objectif de ce processus est de prendre des photos à l'aide d'un microscope digital avec des grossissements variés de 50X et 100X, afin d'examiner le taux de porosité.

Le processus a été exécuté en utilisant une polisseuse automatique BUEHLER MOTOPOL 2000 sous lubrification à eau, avec une force de broche de 20N et une vitesse de rotation du plateau de 250 RPM. La figure 2.10 illustre le principe de polissage.

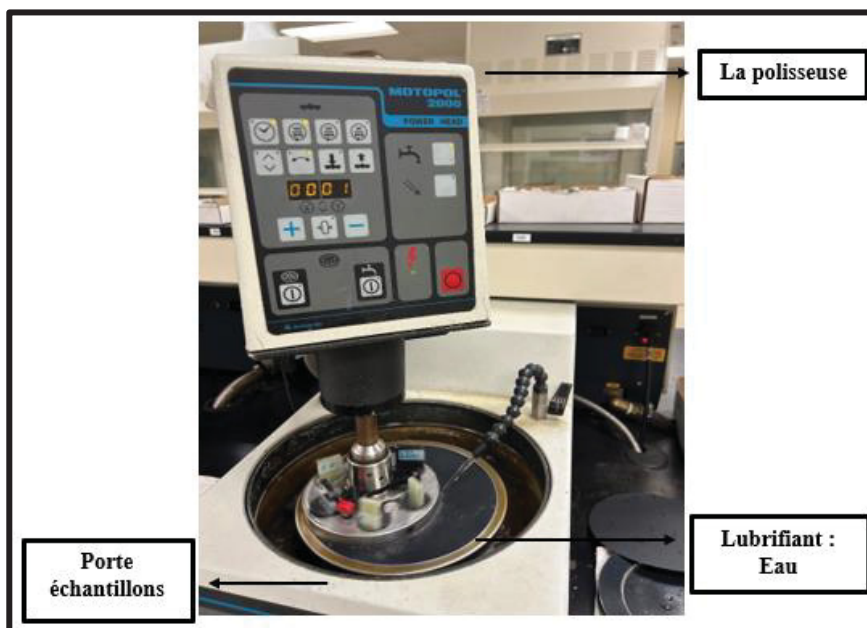


Figure 2.10 Le principe de polissage

Six tailles de grains de papier abrasif ont été employées pour le processus de polissage. Six échantillons ont été fixés simultanément à l'aide d'un porte échantillon, permettant ainsi un gain de temps. Chaque paire présente un pourcentage identique de cire et de graphène. Le support des échantillons est illustré dans la figure 2.11

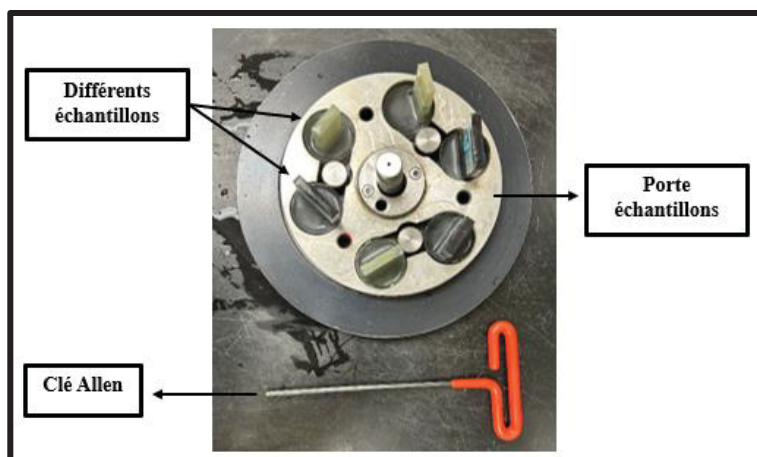


Figure 2.11 Le support des échantillons utilisé

On a commencé avec le papier abrasif ayant les plus grands grains jusqu'au papier avec petits grains. Pour chaque taille de grain, la durée du premier segment est généralement plus longue que celle du dernier. Par exemple, avec un papier de verre de 1200, la première séquence dure 1 minute tandis que la dernière avec un 15ème papier de verre (15 séquences avec cette granulométrie de 1200) dure 10 secondes. Ce changement peut prévenir une détérioration prématurée du papier abrasif, garantissant ainsi une abrasion uniforme et limitant les risques de rayures ou d'imperfections sur la surface de la fibre de verre, ce qui contribue à améliorer la qualité de la finition de l'échantillon.

Tableau 2.5 Séquences de polissage des échantillons

Taille des grains de papier de verre	Numéro de séquence	Temps
250	3	2 minutes
320	2	1 minutes
320	4	40 secondes
400	3	1 minutes
400	4	40 secondes
600	2	1 minutes
600	4	40 secondes
600	4	20 secondes

Taille des grains de papier de verre	Numéro de séquence	Temps
800	1	1 minutes
800	4	40 secondes
800	4	20 secondes
1200	1	1 minutes
1200	5	40 secondes
1200	5	20 secondes
1200	3	10 secondes

2.3.5 Les interprétations sur les micrographies de GFRP 50X et 100X

Le traitement d'image micrographique est considéré comme une bonne approche pour évaluer le niveau de porosité dans les échantillons. À l'aide d'un microscope optique NIKON éclipse MA100N doté d'une caméra avec des grossissements variés de 50X et 100X, nous avons observé chaque échantillon (figure 2.12 (1)). Les échantillons présentent des différences notables en termes de répartition des fibres et de porosité. L'échantillon A (C0,G0) montre une répartition relativement uniforme des fibres, mais avec plusieurs vides dispersés dans la matrice. En revanche, B (C0,G0,25) affiche une densité de vides plus élevée dans certaines zones, probablement due à l'ajout de graphène. L'échantillon C (C0,G2) révèle des couches distinctes, suggérant une meilleure organisation des fibres, bien que certaines couches présentent une augmentation des vides. D (C1,G0) montre une répartition similaire, mais avec une porosité légèrement plus marquée. E (C1,G0,25) affiche des vides relativement uniformes et une structure plus compacte. L'échantillon F (C1,G2) présente une distribution plus fine des fibres avec moins de porosité visible. G (C2,G0) montre des couches de fibres plus larges avec des zones de vide localisées, bien que ces dernières soient moins nombreuses. H (C2,G0,25) présente une répartition des fibres semblable à G, mais avec une porosité légèrement plus importante. Enfin, I (C2,G2) se distingue par une structure très homogène et un niveau de porosité relativement faible, suggérant que ce traitement a permis de minimiser les défauts dans le composite.

Les échantillons tels que F (C1,G2) et I (C2,G2) semblent avoir les meilleures structures, avec une porosité minimale. En revanche, les échantillons comme B (C0,G0,25) montrent une porosité plus marquée. Donc on peut conclure que les pourcentages en poids des cires et des graphène utilisés pour fabriquer les différents composites ont un impact significatif sur le taux de porosité ainsi que la méthode de fabrication utilise à un impact sur la distribution des fibres. Les échantillons avec une quantité plus élevée de cire et de graphène semblent avoir une distribution de fibres plus homogène et moins de porosité.

La figure 2.12(2) présente une photo microscopique de l'échantillon avec $C = 0 \%$ et $G = 0 \%$, mettant en évidence la présence de vides.

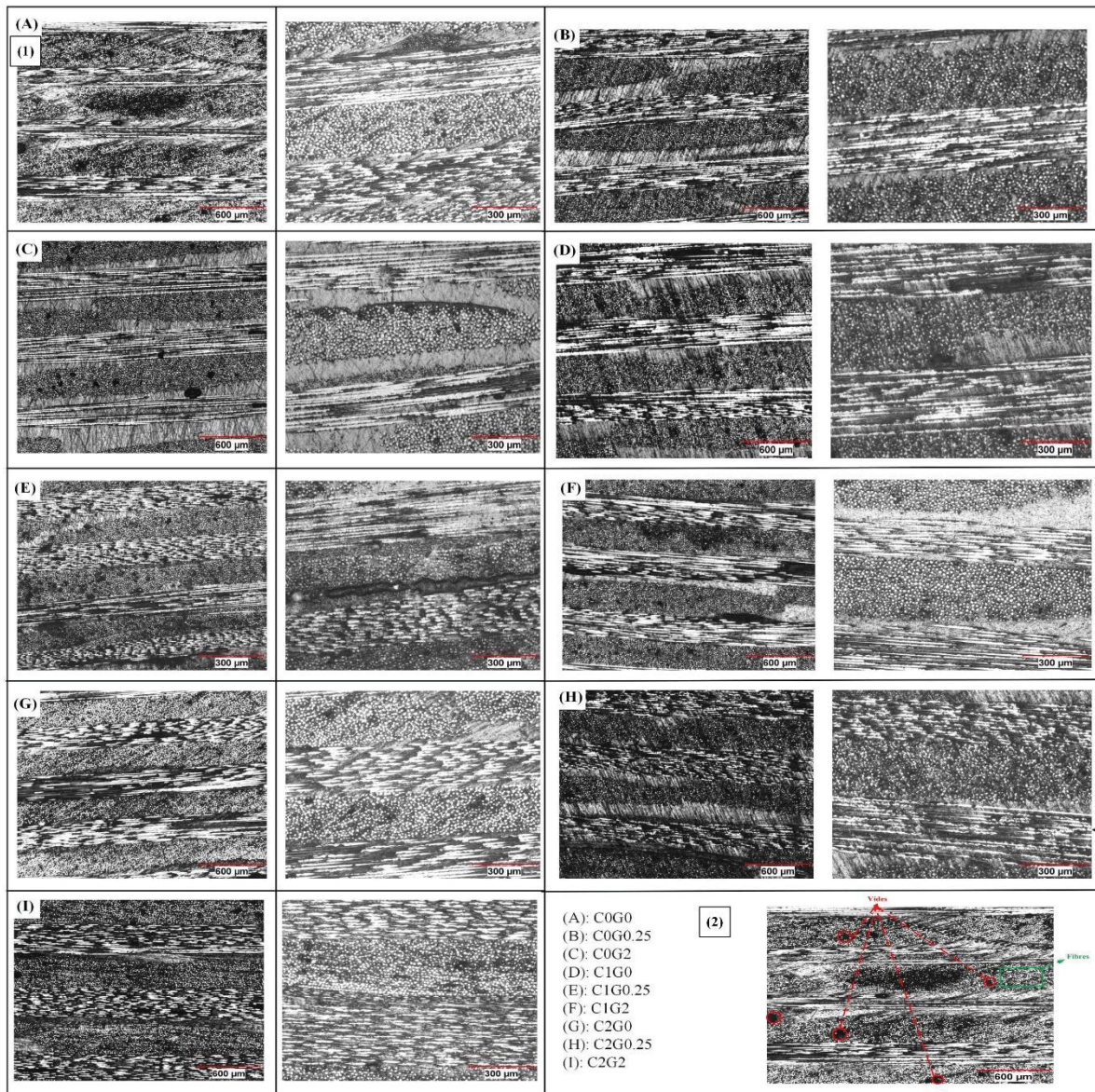


Figure 2.12 Les micrographies de GFRP 50X et 100X

2.4 Équipement et instruments de mesure

2.4.1 Équipement utilisé pour le perçage

Le processus de perçage a été effectué à l'aide d'une fraiseuse CNC à trois axes de la marque Huron, modèle K2X10, capable d'atteindre une vitesse de rotation maximale de 28000 tours

par minute, avec une puissance de 40 kW (Figure 2.13). La machine est équipée d'un système d'aspiration des poussières produites lors du perçage de même que d'une table dynamométrique pour mesurer les forces de coupe. La figure 2.14 montre ce système de même que la table dynamométrique sur laquelle est fixée le système de montage (système de blocage) de la plaque GFRP prête pour l'opération de perçage.



Figure 2.13 Centre d'usinage Huron K2X10 tirée de Lorjuste (2024)

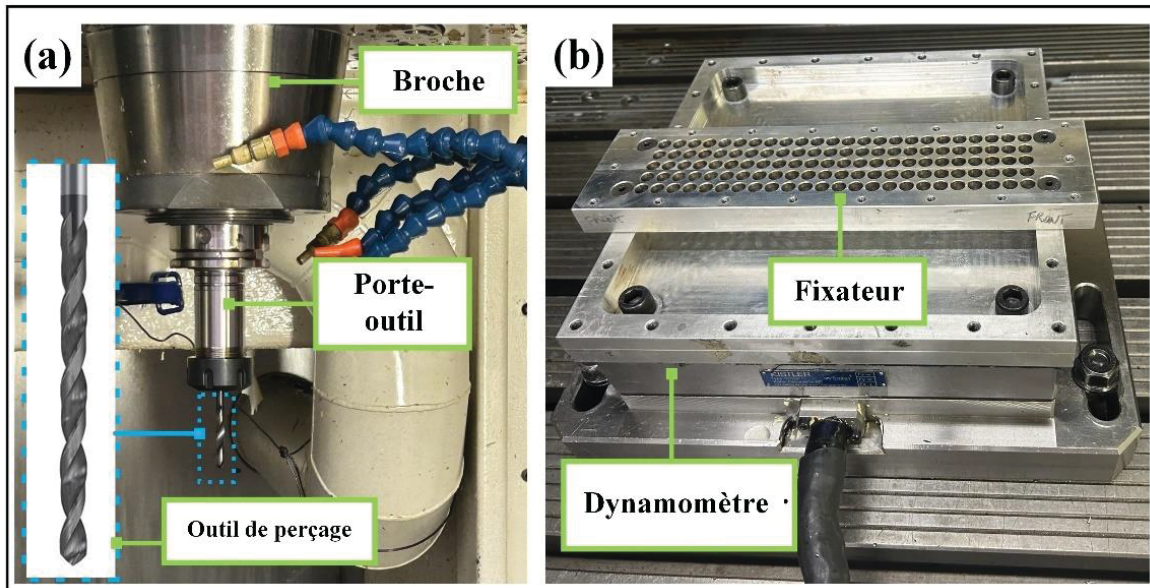


Figure 2.14 Outil de coupe et montage d'usinage sur la table dynamométrique

L'outil de coupe monté dans la broche est un foret de diamètre 7/32 pouce (5,556 mm) revêtu de DVC fourni par le manufacturier COREHOG.



Figure 2.15 Caméra thermique VarioCAM® HD head 900

Une caméra thermique (figure 2.15) a enregistré l'évolution de la température de l'outil tout au long du processus de perçage. L'analyse des vidéos obtenues a permis d'identifier la température la plus élevée à l'aide de logiciel GRAYESS IRT Analyser et de calculer les températures moyennes lors du perçage et ensuite les utilisées pour le traitement des données thermiques. La figure 2.16 montre des photos prise de vidéos.

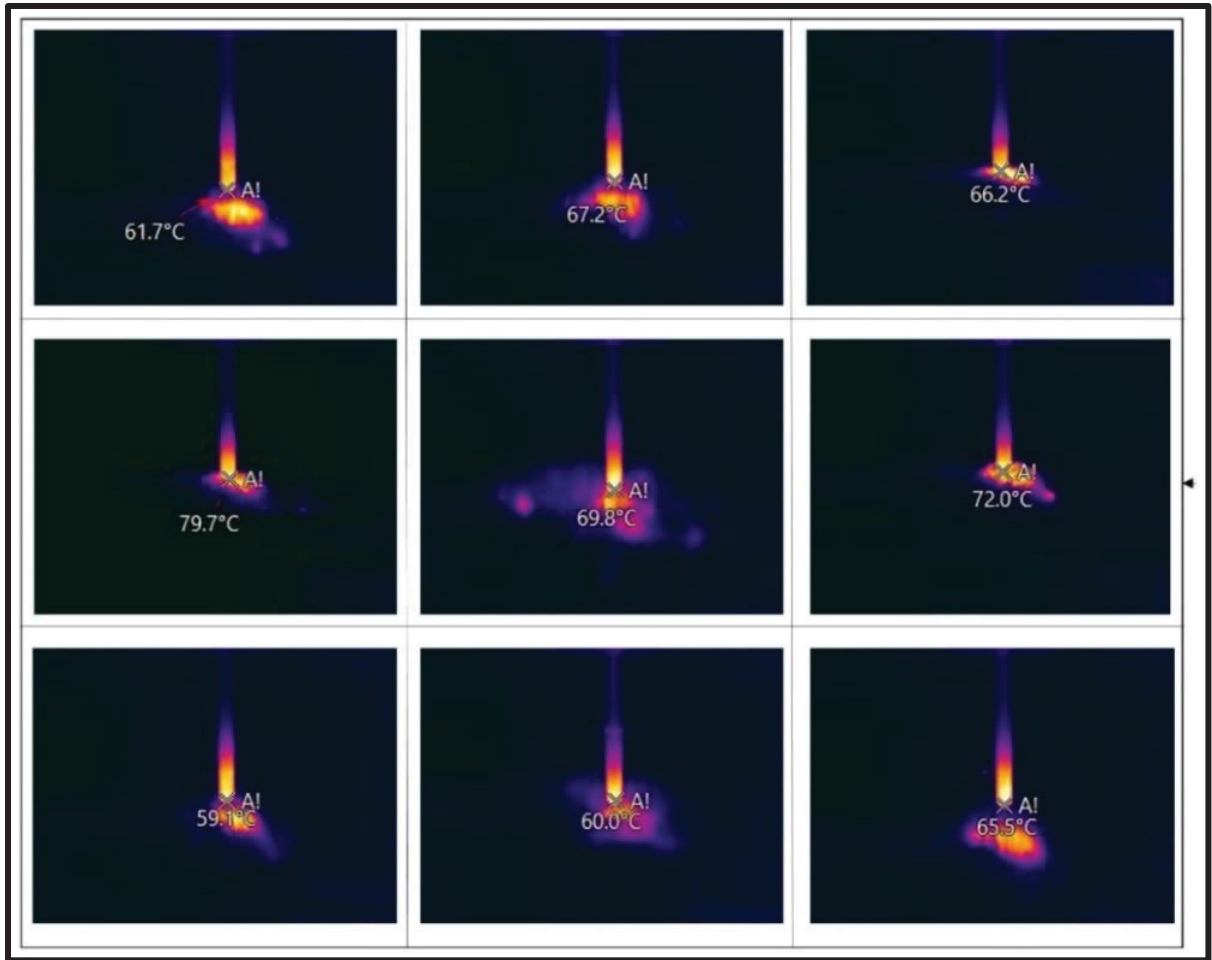


Figure 2.16 Analyse thermique de l'outil après le perçage avec les paramètres de coupe ($V_c=50\text{mm/min}$ et $N_f=0.04\text{mm/tr}$) prise par le logiciel GRAYESS IRT Analyser

2.4.2 Mesure de la rugosité de surface

Les mesures de rugosité ont été effectuées à cinq positions différentes sur chaque trou pour avoir une bonne précision (figure 2.17).

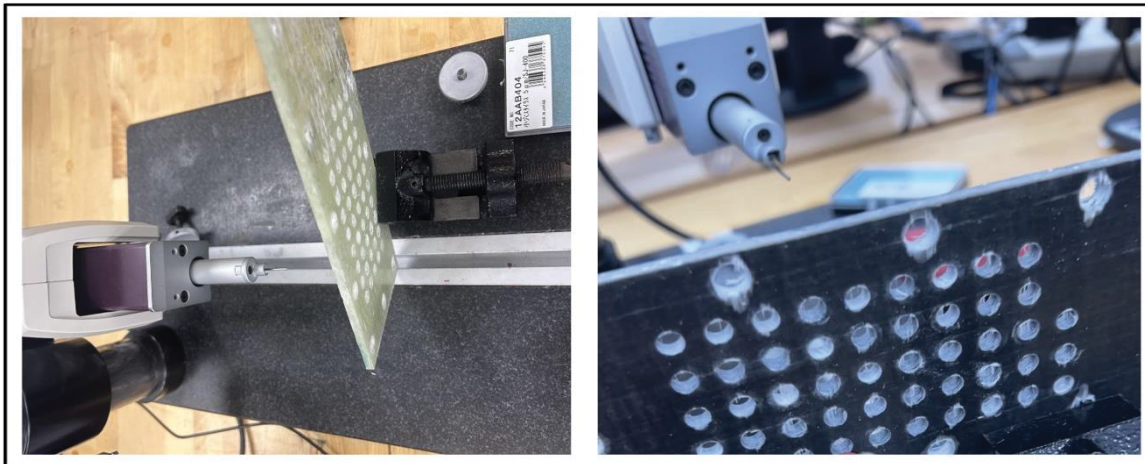


Figure 2.17 Deux positions différentes pour mesurer la rugosité

La mesure de la rugosité a été réalisée à l'aide d'un profilomètre Mitutoyo SJ-410 et conformément à la norme ISO 4284-1997. Le tableau 2.6 spécifie les paramètres utilisés pour la mesure avec le profilomètre.

Tableau 2.6 Paramètres du profilomètre

Paramètre	Ra
Profondeur de trou	5 mm
Nombre de mesure	5
Longueur de mesure	2,5 mm
Longueur d'évaluation	12,5 mm
Range of Ra	$2 < Ra \leq 10$

CHAPITRE 3

Résultats et discussions

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats de l'étude sur les effets de la cire et du graphène sur le perçage de GFRP, en mettant en avant l'influence des paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et les pourcentages d'additifs. Nous avons analysé les forces de coupe, les températures générées, ainsi que la rugosité des surfaces percées. Pour valider et renforcer nos résultats, nous avons appliqué divers tests statistiques, dont le test de normalité, le test de Student, le test de contribution et une analyse de régression.

Le chapitre se conclura par une synthèse des principales conclusions de cette étude, ainsi que des recommandations pour les recherches futures visant à approfondir la compréhension et à améliorer les procédés de perçage de la fibre de verre.

3.2 Influence des paramètres de coupe et des pourcentages de graphène et de cire sur la force F_z de coupe

Dans le cadre de cette étude, il est important d'analyser l'influence des paramètres de coupe et des pourcentages d'additifs sur la force de coupe F_z . Le GFRP, reconnu pour sa résistance et sa légèreté, pose des défis particuliers lors du perçage en raison de la nature abrasive des fibres de verre et de la matrice polymère. Des paramètres de coupe comme la vitesse de rotation, la vitesse d'avance et la géométrie de l'outil, ainsi que les pourcentages d'additifs, impactent significativement la force de coupe F_z .

Cette section examine l'effet de ces variables sur la force de coupe F_z , en visant à optimiser les conditions de perçage pour réduire l'usure de l'outil et améliorer la qualité des trous. Les résultats expérimentaux et les analyses théoriques offrent une compréhension approfondie des

interactions complexes entre les paramètres de coupe et les additifs, permettant de formuler des recommandations pratiques pour le perçage des composites GFRP.

3.2.1 Évaluation de la Force de Coupe F_z

3.2.1.1 Évaluation de la force de coupe F_z pour les plaques GFRP à 0% de cire et à pourcentage de graphène variable

La surface de la plaque contenant 0% de cire et 0,25% (figure 3.1) de graphène montre une augmentation de la force de coupe, atteignant 38,61 N avec une vitesse de coupe de 200 mm/min et une vitesse d'avance de 0,08 mm/min. En comparaison, la force de coupe pour la plaque avec 0% de cire et 2% de graphène est légèrement inférieure, à 36,63 N. Cependant, pour la plaque sans cire ni graphène, la force de coupe est nettement plus faible, à 30,67 N.

Par ailleurs, l'analyse a révélé une diminution de la force de coupe avec une vitesse de coupe de 200 mm/min et une vitesse d'avance de 0,02 mm/min sur la plaque GFRP sans cire ni graphène, atteignant seulement 13,41 N. Cette force a légèrement augmenté à 13,81 N pour la plaque avec 0,25% de graphène, mais a diminué à 11,23 N pour celle avec 2% de graphène. Parmi les configurations évaluées, la plaque associant 0% de cire et 2% de graphène s'est révélée particulièrement prometteuse, montrant une réduction notable de la force de coupe.

L'augmentation de la force de coupe avec la vitesse de coupe s'explique par l'accroissement de la quantité de matériau enlevé par l'outil par unité de temps. De même, la force de coupe croît avec la vitesse d'avance, en raison de l'augmentation de la surface de contact entre l'outil et la pièce à usiner. Donc on peut conclure que le manque de graphène provoque une diminution de force de coupe, due à leur faible résistance à la déformation.

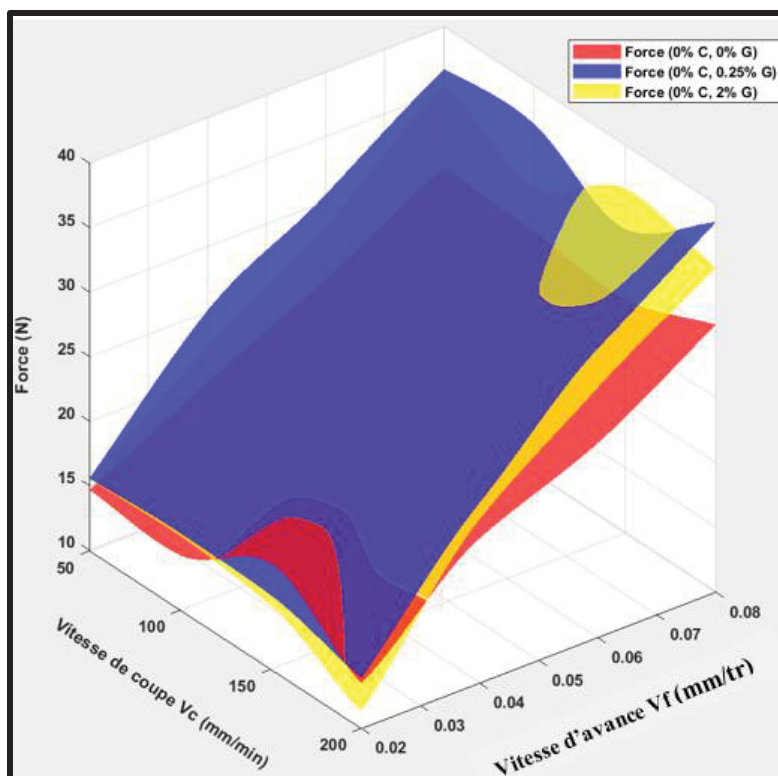


Figure 3.1 Influence de 0% de cire et de pourcentage de graphène variable (0,0,25,2) sur la force de coupe F_z

En se référant au diagramme, on observe que la courbe de force pour le matériau contenant 2% de graphène est plus pentue que celle pour le matériau sans graphène, indiquant une plus grande sensibilité aux variations de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance. Il est vrai que la réduction de graphène réduit la force de coupe d'environ 5,13%, la faisant passer de 38,61 N à 36,63 N. Cependant, la force de coupe la plus faible, soit 30,67 N, est obtenue avec la plaque sans cire ni graphène.

3.2.1.2 Évaluation de la force de coupe F_z pour les plaques GFRP à 1% de cire et à pourcentage de graphène variable

La surface de la plaque contenant 1% de cire et 0% de graphène (figure 3.2) montre une force de coupe atteignant 28,79 N avec une vitesse de coupe de 150 mm/min et une vitesse d'avance de 0,08 mm/min. En comparaison, la force de coupe pour la plaque avec 1% de cire et 0,25% de graphène augmente légèrement à 29,05 N avec des paramètres de 200 mm/min et 0,08

mm/min. Cependant, pour la plaque avec 1% de cire et 2% de graphène, la force de coupe atteint la valeur la plus élevée de 31,07 N avec une faible vitesse de coupe de 50 mm/min et la plus grande vitesse d'avance de 0,08 mm/min.

Par ailleurs, l'analyse a révélé une diminution significative de la force de coupe avec une vitesse de coupe de 200 mm/min et une vitesse d'avance de 0,02 mm/min sur la plaque GFRP contenant 1% de cire sans graphène, atteignant seulement 11,27 N. Cette force a légèrement augmenté à 12,26 N pour la plaque avec 0,25% de graphène, et a encore augmenté à 13,75 N pour celle avec 2% de graphène. Parmi les configurations évaluées, la plaque associant 1% de cire et 0% de graphène s'est révélée particulièrement prometteuse, montrant une réduction notable de la force de coupe.

Le matériau contenant 1% de cire et une concentration plus élevée de graphène présente une force de coupe supérieure en raison de l'augmentation de la rigidité et de la résistance à la déformation du matériau.

En se référant au diagramme, on observe que la surface de force pour les matériaux contenant 2% de graphène est plus pentue que celle pour le matériau sans graphène, indiquant une plus grande sensibilité aux variations de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance. Le diagramme montre que l'ajout de graphène augmente la force de coupe, passant de 28,79 N à 31,07 N.

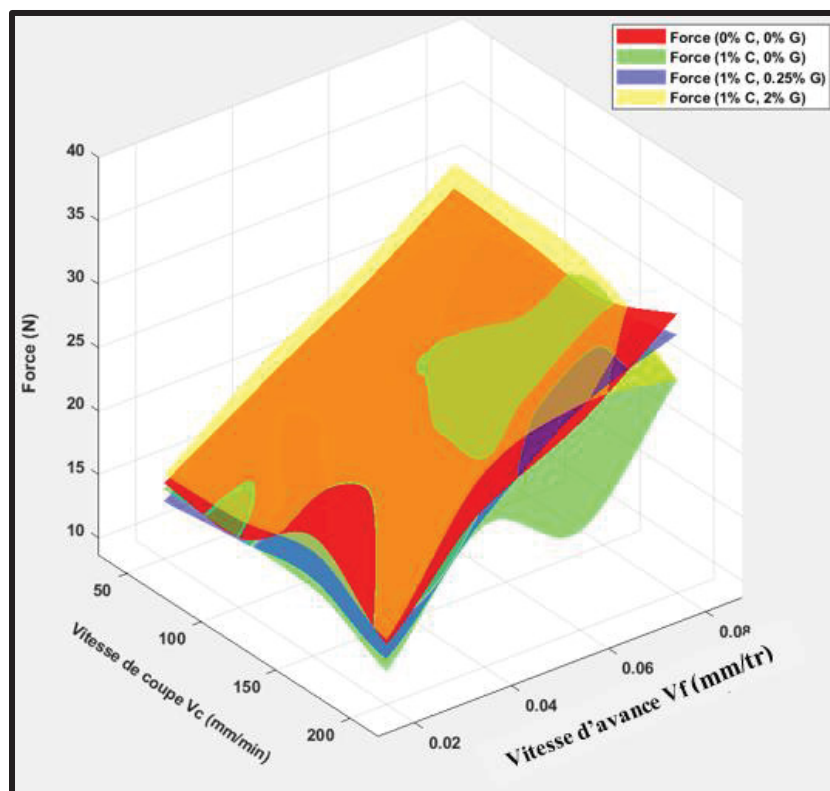


Figure 3.2 Influence de 1% de cire et de pourcentage de graphène variable (0,0,25,2) sur la force de coupe F_z

On peut conclure que la force de coupe augmente progressivement avec l'ajout de graphène lorsque la concentration de cire est de 1%.

3.2.1.3 Évaluation de la force de coupe F_z pour les plaques GFRP à 2% de cire et à pourcentage de graphène variable

La surface de la plaque contenant 2% de cire et 2% de graphène (figure 3.3) montre la plus grande valeur de force de coupe, atteignant 32,69 N avec une vitesse de coupe de 200 mm/min et une vitesse d'avance de 0,08 mm/min. En comparaison, la force de coupe maximale pour la plaque avec 2% de cire et 0,25% de graphène est 30,14 N avec une vitesse de coupe de 150 mm/min et une vitesse d'avance de 0,08 mm/min, alors que celle de la plaque avec 2% de cire et 0% de graphène, atteint 28,58 N avec des paramètres de 100 mm/min et 0,08 mm/min.

Par ailleurs, l'analyse a révélé une diminution significative de la force de coupe avec une vitesse de coupe de 200 mm/min et une vitesse d'avance de 0,02 mm/min pour la plaque GFRP contenant 2% de cire et 0,25% de graphène, atteignant seulement 9,14 N. Cette force a légèrement augmenté à 10,17 N pour la plaque avec 2% de graphène, et a encore augmenté à 13,62 N pour celle sans graphène. Parmi les configurations évaluées, la plaque associant 2% de cire et 0,25% de graphène s'est révélée particulièrement prometteuse, montrant une réduction notable de la force de coupe.

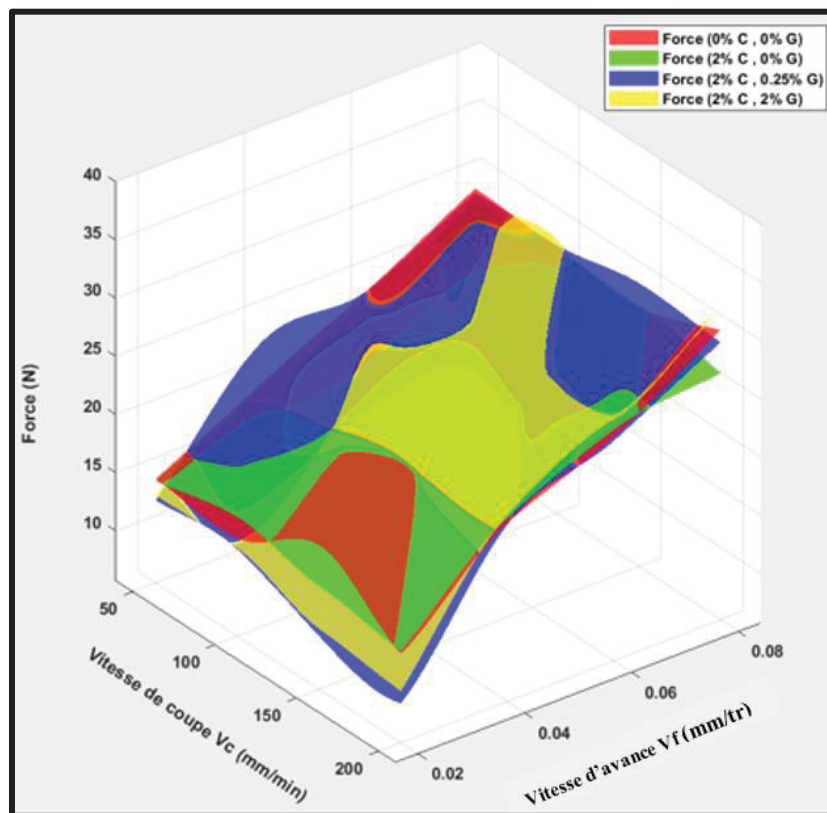


Figure 3.3 Influence de 2% de cire et de pourcentage de graphène variable (0,0,25,2) sur la force de coupe F_z

Le matériau contenant 2% de cire et une concentration plus élevée de graphène présente une force de coupe supérieure en raison de l'augmentation de la rigidité et de la résistance à la déformation du matériau.

Un article scientifique a été produit concernant l'effet des additifs sur les forces de perçage il est présente au chapitre 4.

3.2.2 Paramètres influents et équations de prédiction des forces de coupe

L'annexe IV étudie l'évaluation précise de la force de coupe F_z lors des processus de perçage. Pour examiner les différentes méthodes et tests statistiques, nous explorerons l'analyse de la variance (ANOVA), les tests de normalité, la régression, le test t de Student et le test de contribution. Cette exploration nous permettra d'obtenir une compréhension approfondie des facteurs influençant la force de coupe F_z dans diverses conditions d'usinage.

3.3 Influences des paramètres de coupe et des pourcentages de graphène sur la température d'outil de coupe

3.3.1 Évaluation de la température de coupe

L'étude de la température dans les processus d'usinage revêt une importance capitale, car elle joue un rôle déterminant non seulement sur la qualité de la surface usinée, mais aussi sur la durée de vie des outils et l'efficacité globale du processus. Une température excessive peut entraîner une détérioration prématurée des outils, une perte de précision dimensionnelle, et une finition de surface médiocre, ce qui compromet la productivité et la rentabilité.

La mesure précise, l'analyse détaillée, et la modélisation rigoureuse de la température sont donc essentielles pour mieux comprendre les mécanismes thermiques complexes à l'œuvre lors de l'usinage. Ces analyses permettent d'identifier les paramètres qui influencent le plus la génération de chaleur, tels que la vitesse de coupe et la vitesse d'avance.

L'utilisation d'additifs, tels que la cire et le graphène, joue un rôle crucial dans la réduction de la chaleur générée pendant l'usinage. Ces additifs agissent comme des lubrifiants et dissipateurs thermiques, aidant à limiter l'accumulation de chaleur à la surface de coupe. Cependant, l'efficacité de ces additifs dépend fortement de leur concentration. Des concentrations optimales doivent être déterminées pour maximiser les bénéfices en termes de réduction de chaleur sans compromettre les autres aspects du processus, tels que la stabilité de l'usinage et la qualité de la surface. Par conséquent, la recherche d'un équilibre optimal dans

l'utilisation de ces additifs est essentielle pour améliorer la performance globale des opérations d'usinage.

L'analyse de la température en fonction des différents paramètres d'usinage, tels que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la concentration de cire et la concentration de graphène, révèle des tendances intéressantes. Les Figures 3.4 et 3.5 illustrent ces évolutions. La Figure 3.4 montre l'évolution de la température en fonction de la vitesse d'avance, tandis que la Figure 3.5 représente la température en fonction de la vitesse de coupe.

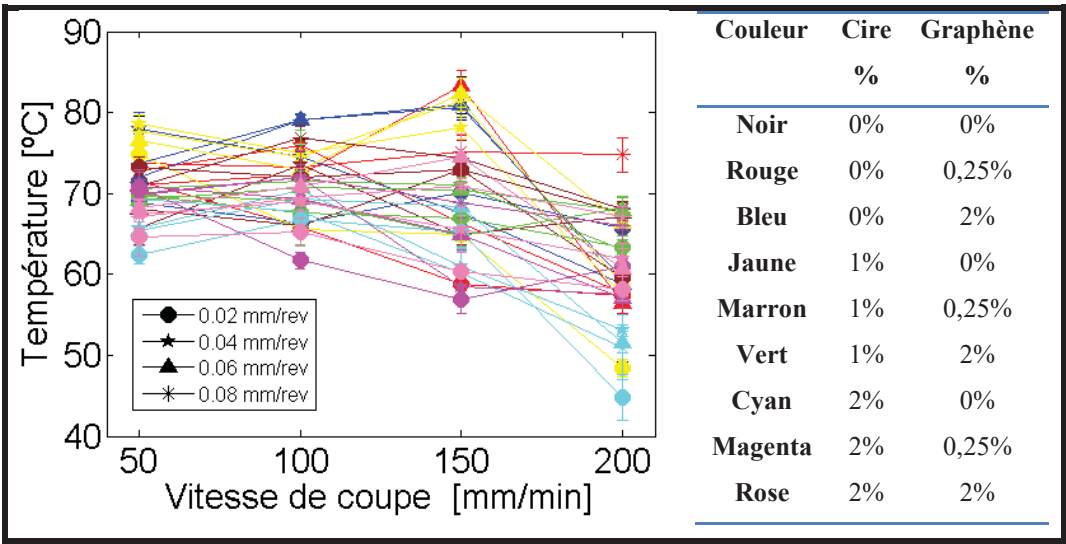


Figure 3.4 Effet de la vitesse d'avance sur la température à différentes vitesses de coupe et concentrations de cire et de graphène

En ce qui concerne la vitesse d'avance, on observe une augmentation progressive de la température à mesure que la vitesse d'avance augmente. Par exemple, à une vitesse d'avance de 0,08 mm/rev, la température moyenne tend à être plus élevée que pour les vitesses d'avance inférieures. Cette tendance se maintient à travers différentes combinaisons de cire et de graphène, suggérant que l'augmentation de la vitesse d'avance contribue à une génération de chaleur plus importante.

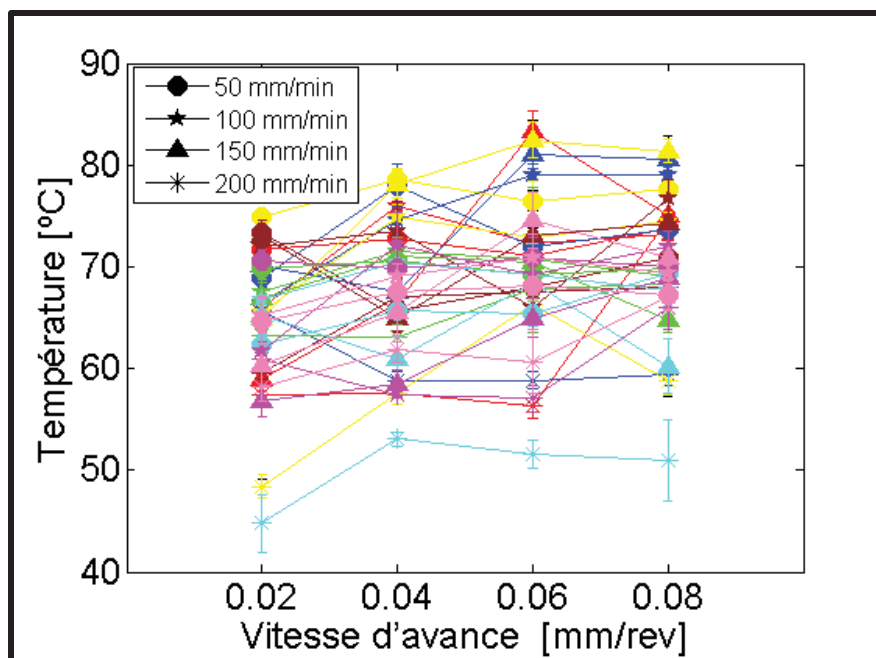


Figure 3.5 Effet de la vitesse de coupe sur la température à différentes vitesses d'avance et concentrations de cire et de graphène

La relation entre la vitesse de coupe et la température est plus complexe. Contrairement à une progression linéaire attendue, les températures varient de manière non linéaire avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Par exemple, à une vitesse de coupe de 200 mm/min, la température moyenne peut être plus basse que celle obtenue à des vitesses inférieures comme 150 mm/min. Cela pourrait s'expliquer par une meilleure dissipation de la chaleur à des vitesses de coupe plus élevées.

Lorsqu'on analyse la température en fonction de la concentration de cire, on remarque que pour 0% de cire, les températures moyennes varient largement, de 55,7°C à 68,2°C, ce qui peut être attribué à l'absence d'agent lubrifiant. Avec l'ajout de 1% de cire, la température moyenne augmente légèrement, atteignant des pics proches de 75°C dans certains cas. Cela pourrait indiquer que la cire interagit avec le matériau de manière complexe, augmentant la température par rapport à l'absence de cire. L'ajout de 2% de cire, cependant, diminue à nouveau la température moyenne, suggérant un effet lubrifiant plus efficace à cette concentration.

Pour les concentrations de graphène, les résultats montrent que sans graphène, les températures varient entre 55,7°C et 73°C, avec des pics plus élevés à des vitesses de coupe intermédiaires.

L'ajout de 0,25% de graphène entraîne une légère réduction de la température moyenne, bien que la variabilité reste présente, indiquant que le graphène aide à dissiper la chaleur plus efficacement. À 2% de graphène, la température moyenne se stabilise, avec une variabilité légèrement réduite, suggérant que l'effet lubrifiant du graphène atteint son efficacité maximale à cette concentration.

En conclusion, l'ajustement des vitesses d'avance et de coupe, ainsi que des concentrations de cire et de graphène, a un impact significatif sur la gestion thermique du processus d'usinage. La variabilité observée souligne l'importance d'optimiser ces paramètres pour améliorer la qualité de surface et prolonger la durée de vie des outils. Une analyse statistique plus approfondie pourrait affiner ces conclusions et aider à mieux comprendre les interactions complexes entre ces variables.

Le diagramme circulaire en 3D de la figure 3.6, créé à partir des résultats des contributions des différents paramètres, offre une visualisation claire de l'influence relative de chaque paramètre sur la température lors du processus d'usinage. Ce diagramme met en évidence que la vitesse de coupe est de loin le facteur le plus dominant, représentant 67,28% de l'impact total sur la température. Cela souligne l'importance cruciale de la vitesse de coupe dans la gestion de la chaleur générée lors de l'usinage. Une optimisation précise de ce paramètre est donc essentielle pour contrôler la température et, par conséquent, améliorer la qualité de l'usinage.

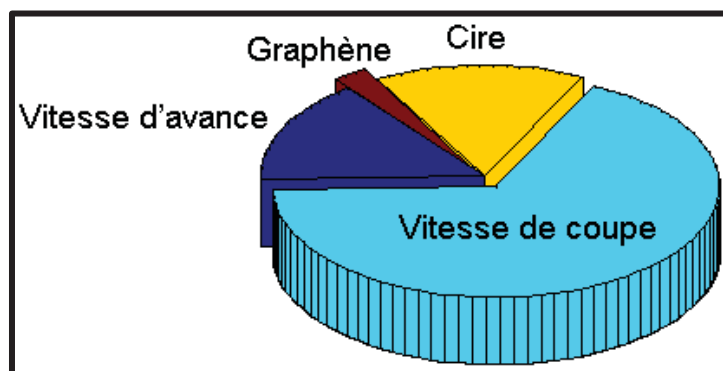


Figure 3.6 Contribution des Paramètres d'Usinage à la Température Générée : Diagramme Circulaire en 3D

En comparaison, la vitesse d'avance et la concentration de cire ont des contributions similaires, représentant respectivement 15% et 15,1% de l'effet total. Bien que ces contributions soient significatives, elles sont nettement inférieures à celle de la vitesse de coupe. Cela suggère que, bien que la vitesse d'avance et la cire aient un impact important, leur influence est secondaire par rapport à la vitesse de coupe. L'ajustement de ces paramètres peut donc offrir des améliorations supplémentaires en termes de contrôle thermique, mais dans une moindre mesure.

Enfin, la concentration de graphène présente la plus faible contribution, avec seulement 2,48% de l'impact total. Ce faible pourcentage indique que l'effet du graphène sur la température est limité. Bien que le graphène puisse jouer un rôle dans d'autres aspects du processus d'usinage, sa capacité à influencer la température est minime par rapport aux autres paramètres étudiés.

En résumé, le diagramme circulaire en 3D souligne que la vitesse de coupe est le paramètre le plus critique pour le contrôle de la température, tandis que la vitesse d'avance et la cire offrent des contributions secondaires, et que l'impact du graphène est négligeable dans ce contexte spécifique. Ces résultats orientent clairement les efforts d'optimisation vers une gestion précise de la vitesse de coupe pour améliorer le processus d'usinage.

3.3.1.1 Impact de la concentration de cire sur la température d'usinage et l'incertitude associée

L'analyse des températures en fonction de la concentration de cire, indépendamment des autres paramètres tels que l'avance et la vitesse de coupe, révèle des tendances intéressantes. La figure 3.7 montre que les moyennes des températures pour chaque concentration de cire sont respectivement de 68,7°C pour 0% de cire, 69,6°C pour 1% de cire, et 64,5°C pour 2% de cire.

Tout d'abord, il est important de noter que l'augmentation de la concentration de cire de 0% à 1% est associée à une légère augmentation de la température moyenne, passant de 68,7°C à 69,6°C (Fig. 3.7). Cette augmentation suggère que l'ajout de cire à 1% n'a pas d'effet de refroidissement significatif et pourrait même légèrement augmenter la température due aux interactions thermiques complexes entre la cire et le matériau.

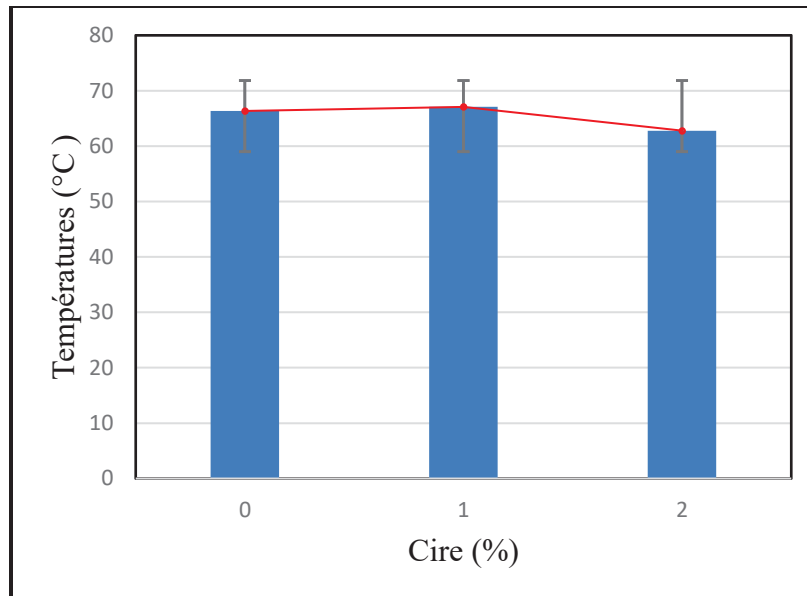


Figure 3.7 Températures en fonction de la concentration de cire, indépendamment des autres paramètres

En revanche, lorsque la concentration de cire est augmentée à 2%, la température moyenne diminue de manière notable, atteignant 64,5°C (Fig. 3.7). Cela indique que, dans ce cas, la cire pourrait jouer un rôle plus efficace dans la dissipation de la chaleur, réduisant ainsi la température générée lors du processus de coupe. Cette réduction de la température pourrait être bénéfique pour prolonger la durée de vie de l'outil et améliorer la qualité de l'usinage.

L'analyse des données de la figure 3.7 met en évidence une variabilité significative des températures au sein de chaque groupe. Ces variations peuvent être dues à l'hétérogénéité des matériaux ou à des conditions d'usinage variables. L'effet de la cire sur la température semble non linéaire, avec des interactions complexes entre les paramètres.

L'ajout de cire à 2 % apparaît comme le plus efficace pour réduire la température pendant le processus de coupe. Cependant, la variabilité observée souligne l'importance d'une analyse plus approfondie pour mieux comprendre l'impact de la cire sur la gestion thermique lors de l'usinage.

3.3.1.2 Impact de la concentration de graphène sur la température d'usinage et l'incertitude associée

L'analyse des températures en fonction de la concentration en graphène (0%, 0,25% et 2%) montre des variations intéressantes, avec des moyennes respectives de 66,3°C, 68°C et 68,5°C (Fig. 3.8). Ces résultats suggèrent que l'ajout de graphène, en particulier à 2%, a tendance à augmenter légèrement la température moyenne par rapport à l'absence de graphène. Cependant, la différence entre les moyennes des concentrations de 0,25% et 2% est minimale, ce qui indique que l'effet du graphène sur la température pourrait atteindre un plateau au-delà d'une certaine concentration.

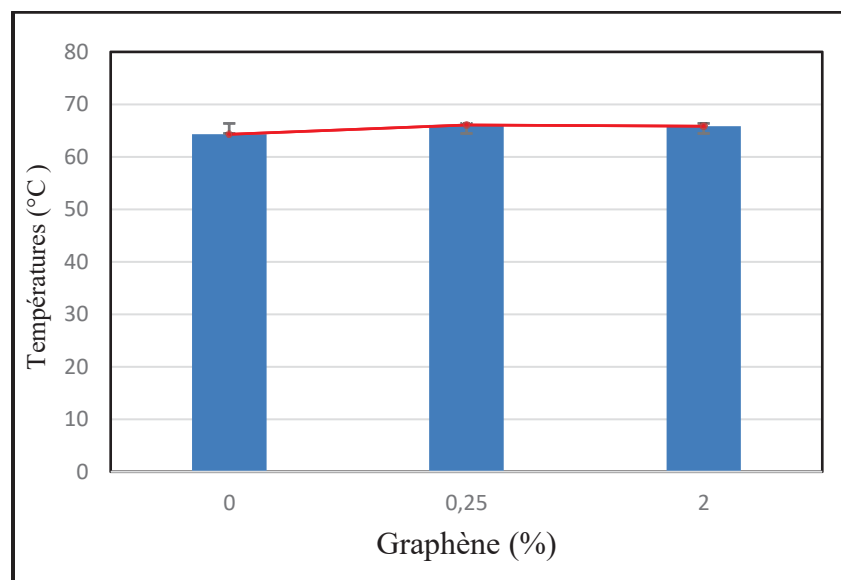


Figure 3.8 Températures en fonction de la concentration de graphène, indépendamment des autres paramètres

La concentration de 0% de graphène présente une température moyenne plus basse que les autres concentrations, ce qui suggère que l'ajout de graphène augmente l'accumulation de chaleur pendant le processus d'usinage. Cela pourrait s'expliquer par une meilleure conductivité thermique du graphène, qui pourrait conduire à une augmentation de la température dans la zone de coupe.

L'analyse de la variabilité des données (Fig. 3.8) révèle une dispersion importante des températures pour chaque concentration. Notamment, dans des conditions spécifiques telles que (1 % cire, 0 % graphène, 150 mm/min, 0,06 mm/rev) et (1 % cire, 0 % graphène, 150 mm/min, 0,08 mm/rev), des températures élevées ont été enregistrées, indiquant une accumulation significative de chaleur. Cela peut avoir des répercussions négatives sur la qualité de surface usinée et la durée de vie de l'outil.

En conclusion, bien que l'ajout de graphène semble augmenter légèrement la température moyenne, il engendre également une variabilité et une incertitude accrues dans les résultats. Cela met en évidence la nécessité d'approfondir l'analyse pour évaluer précisément l'impact de chaque concentration sur la gestion thermique du processus d'usinage.

3.3.1.3 Analyse de l'impact des concentrations de cire et de graphène sur la température moyenne en usinage

L'analyse des données de température moyenne, présentées sous forme de barres dans la figure 3.9 montre des variations intéressantes dans les performances thermiques du processus d'usinage. Pour les échantillons sans cire et sans graphène (0%,0%), la température moyenne est de 66,2°C. Cette valeur sert de référence pour évaluer l'impact des ajouts de cire et de graphène.

Lorsque 0,25% de graphène est ajouté sans cire (0%,0,25%), la température moyenne augmente à 69,1°C, et avec 2% de graphène (0%,2%), elle continue à augmenter pour atteindre 70,8°C. Ces résultats indiquent que l'ajout de graphène, sans cire, conduit à une augmentation de la température moyenne, ce qui pourrait être dû aux propriétés thermiques du graphène qui favorisent l'accumulation de chaleur.

Pour les échantillons contenant 1% de cire, la température moyenne diminue légèrement par rapport à l'absence de cire. Sans graphène (1%,0%), la température moyenne est de 70,8°C. Avec l'ajout de 0,25% de graphène (1%,0,25%), la température moyenne baisse à 69,6°C, et avec 2% de graphène (1%,2%), elle continue de diminuer pour atteindre 68,3°C. Ces résultats suggèrent que l'ajout de graphène, en présence de 1% de cire, aide à réduire la température

générée pendant l'usinage, ce qui pourrait être avantageux pour la qualité et la durabilité des outils.

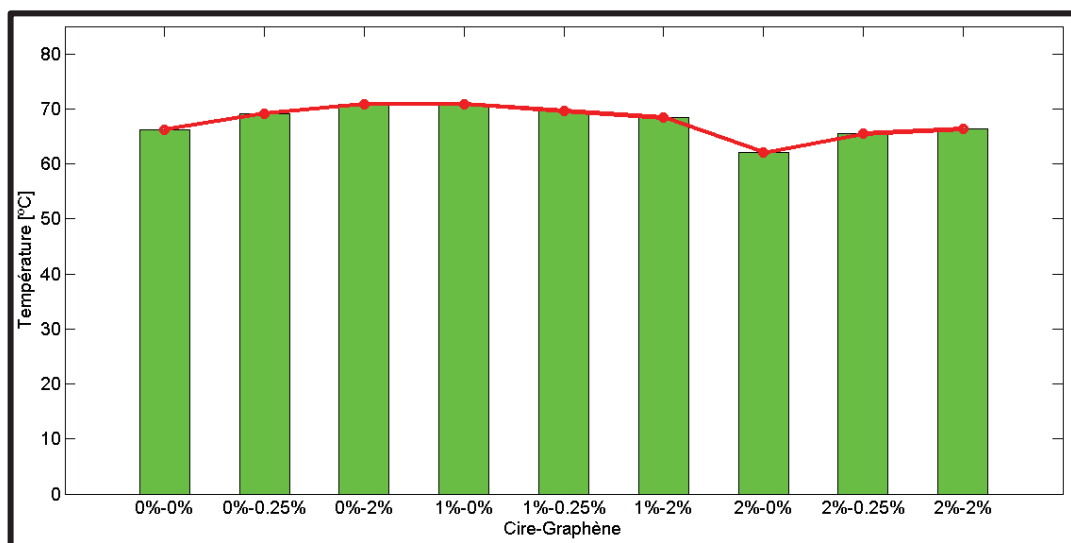


Figure 3.9 Évolution de la température moyenne en fonction de la concentration de cire-graphène, indépendamment des autres paramètres

Enfin, pour les échantillons contenant 2% de cire, la température moyenne est la plus basse sans graphène (2%,0%), à 62°C. Cela montre que l'ajout de cire à cette concentration est très efficace pour réduire la chaleur. Lorsque 0,25% de graphène est ajouté (2%,0,25%), la température moyenne augmente à 65,4°C, mais reste inférieure aux valeurs observées avec des concentrations plus faibles de cire. Avec 2% de graphène (2%,2%), la température moyenne est de 66,3°C, ce qui est légèrement supérieur à la combinaison sans graphène, mais reste encore relativement bas.

Ces résultats indiquent que la réduction de la température dépend non seulement de la concentration de graphène, mais aussi de la concentration de cire. Une concentration plus élevée de cire, en particulier à 2%, semble être la plus efficace pour maintenir des températures plus basses, même avec l'ajout de graphène.

3.3.1.4 Impact de la vitesse d'avance sur la température d'usinage et l'incertitude associée

L'analyse des températures en fonction des vitesses d'avance (0,02, 0,04, 0,06 et 0,08 mm/rev) révèle des tendances intéressantes. En examinant les moyennes, on observe que la température moyenne augmente progressivement avec l'accroissement de la vitesse d'avance. La moyenne la plus basse, 64,7°C, est enregistrée pour une avance de 0,02 mm/rev, tandis que la moyenne la plus élevée, 66°C, est atteinte à 0,08 mm/rev (Fig. 3.10). Cette progression montre une corrélation entre l'augmentation de la vitesse d'avance et les températures générées, bien que cette relation ne soit pas uniforme.

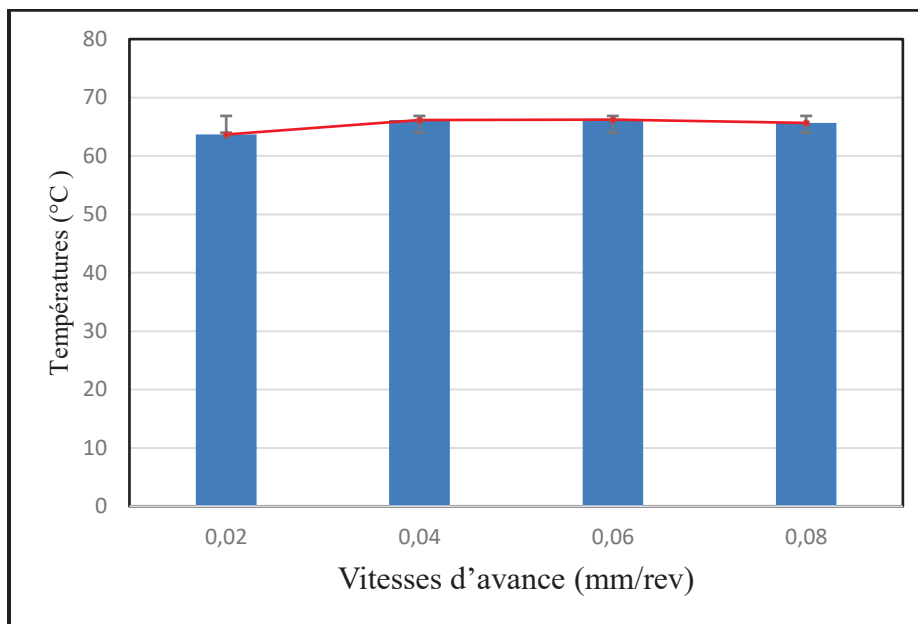


Figure 3.10 Températures en fonction des vitesses d'avance indépendamment des autres paramètres

En conclusion, bien que l'augmentation de la vitesse d'avance tende à accroître les températures, les incertitudes persistent à travers toutes les conditions. Une analyse approfondie pourrait aider à identifier les facteurs sous-jacents responsables de cette variabilité thermique et à affiner les paramètres d'usinage pour une meilleure stabilité du processus.

3.3.1.5 Impact de la vitesse de coupe sur la température d'usinage et l'incertitude associée

L'analyse des températures en fonction des vitesses de coupe révèle une très légère variation entre les vitesses de 50, 100 et 150 mm/min alors qu'une baisse significative de température est observée à la vitesse de 200 mm/min. En effet, les températures moyennes observées à 50 mm/min (68°C), 100 mm/min (70°C) et 150 mm/min (65°C) sont pratiquement identiques alors qu'à la vitesse de coupe de 200 mm/min, la température moyenne chute à 59°C, indiquant une tendance inverse par rapport à l'augmentation des vitesses de coupe (Fig. 3.11).

Cette diminution de la température à la vitesse plus élevée peut s'expliquer par une meilleure évacuation de la chaleur en raison d'une coupe plus rapide, ce qui réduit l'accumulation de chaleur dans la zone de travail. Cependant, il est important de noter que malgré cette baisse de température moyenne à 200 mm/min, il existe encore des variations importantes dans les résultats individuels, certaines températures atteignant des valeurs aussi basses que 44,7°C.

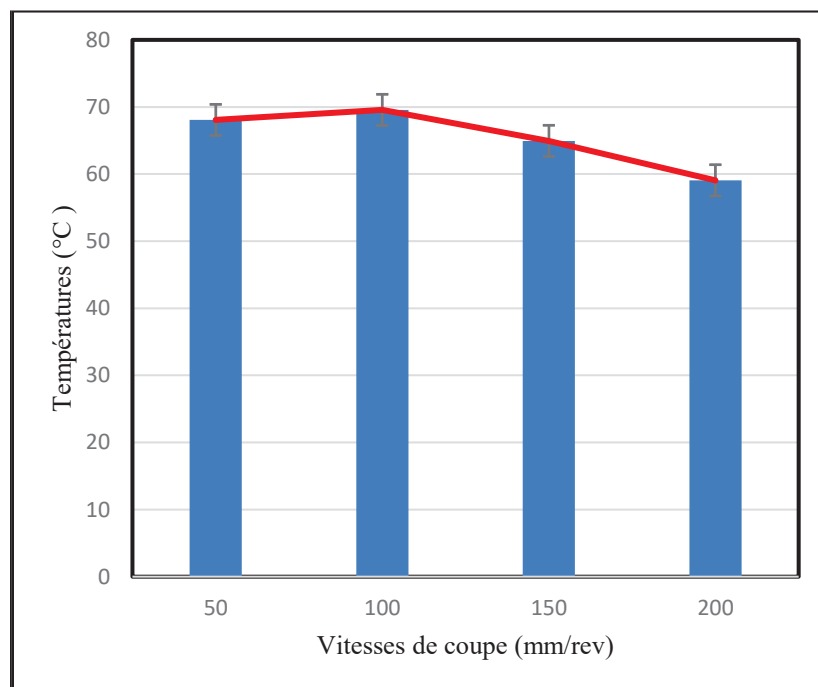


Figure 3.11 Températures en fonction des vitesses d'avance indépendamment des autres paramètres

En conclusion, l'analyse montre que la vitesse de coupe a un impact complexe sur les températures générées lors du processus, avec une tendance générale à la baisse de la température à des vitesses plus élevées, mais une incertitude significative persiste à travers toutes les conditions, nécessitant une attention particulière pour optimiser les paramètres de coupe.

3.3.1.6 Comparaison des résultats de température de l'outil de coupe entre les plaques GFRP (C=0% et G=0%) et (C=2% et G=2%)

Pour la plaque en GFRP avec 2% de cire et 2% de graphène, une augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à 200 mm/min et une diminution de la vitesse d'avance entraînent une réduction de la température de l'outil de coupe, pour atteindre la valeur de 54,9 °C. En revanche, pour la plaque sans cire et sans graphène, la réduction de la température de l'outil de coupe est provoquée par une augmentation simultanée de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance à 200 mm/min et 0,06 mm/min, pour obtenir une valeur de 55,7 °C.

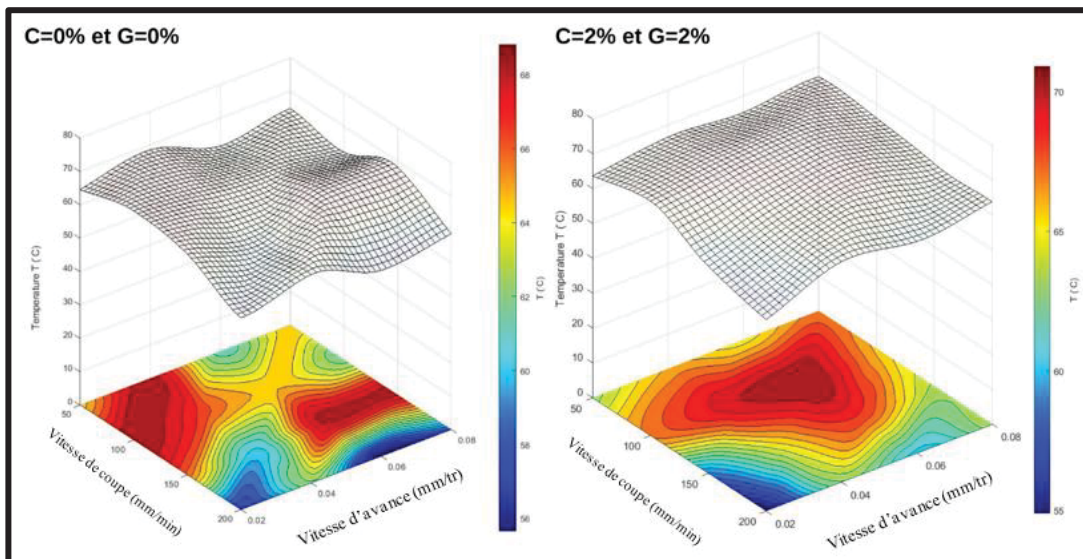


Figure 3.11 Comparaison des résultats de température de l'outil de coupe entre les plaques GFRP (C=0% et G=0%) et (C=2% et G=2%)

3.3.2 Paramètres influents et équations de prédiction des températures de l'outil de coupe

L'évaluation précise de la température de l'outil de coupe est cruciale pour garantir des performances optimales dans les processus d'usinage. Les différentes méthodes et tests statistiques utilisés pour analyser les variations de température de l'outil de coupe en fonction des paramètres de coupe et des pourcentages d'additifs sont présentés à l'annexe V. Des approches telles que l'analyse de la variance (ANOVA), les tests de normalité, la régression, le test t de Student et le test de contribution seront explorées pour une compréhension approfondie des facteurs influençant la température de l'outil de coupe dans diverses conditions d'usinage.

3.4 Influence des paramètres de coupe et les pourcentages des additifs sur les rugosités

3.4.1 Évaluation et analyse de la rugosité

3.4.1.1 Analyse de la rugosité de surface en fonction des conditions de coupe, des concentrations de cire et de graphène dans le procédé d'usinage

Les figures 3.12 et 3.13 présentent une analyse détaillée de la rugosité de surface en fonction des conditions de coupe, des concentrations de cire, et des concentrations de graphène. Le jeu de données englobe diverses vitesses de coupe (50, 100, 150 et 200 mm/min) et avances (0,02, 0,04, 0,06 et 0,08 mm/rev), avec une répartition précise de la rugosité moyenne de surface et de l'écart type pour différentes combinaisons de concentrations de cire et de graphène.

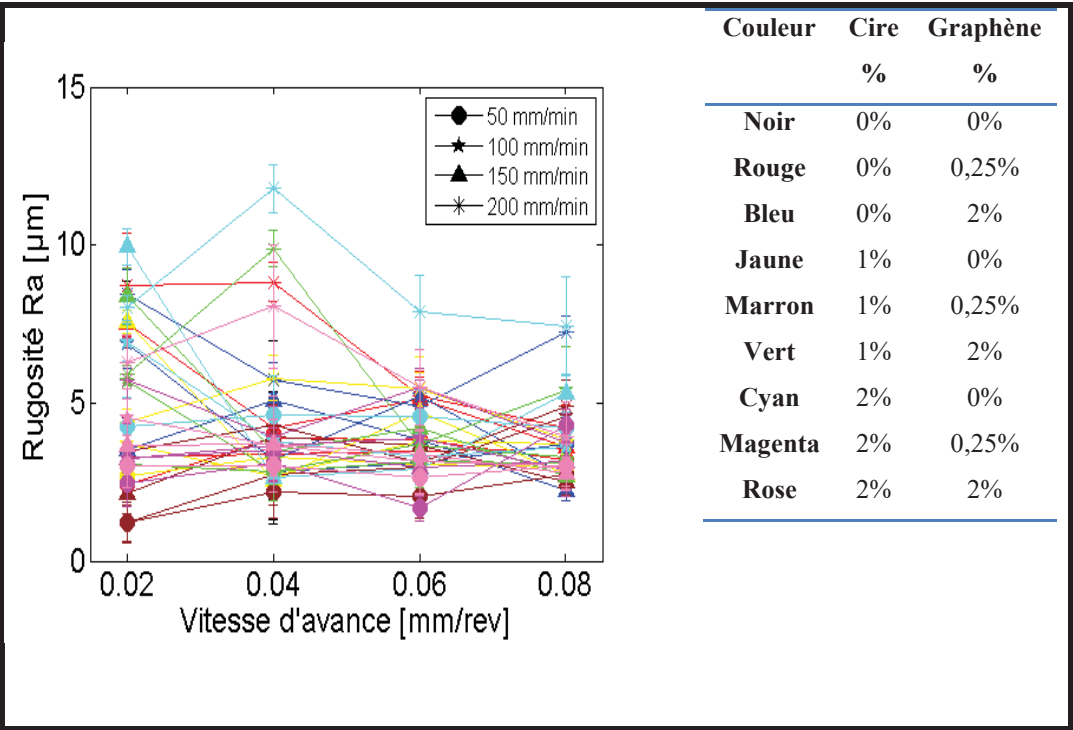


Figure 3.12 Effet de la vitesse d'avance sur la rugosité de la surface à différentes vitesses de coupe et concentrations de cire et de graphène

À première vue, la rugosité de surface varie de manière significative en fonction des différents paramètres de coupe. Par exemple, à une vitesse de coupe de 50 mm/min et sans ajout de cire ou de graphène, la rugosité diminue à mesure que l'avance augmente de 0,02 mm/rev à 0,08 mm/rev, avec des valeurs allant de 5,7 µm à 2,8 µm. Cette tendance est cohérente avec l'idée générale selon laquelle des avances plus faibles produisent généralement des surfaces plus lisses. Cependant, à des vitesses de coupe plus élevées (par exemple, 200 mm/min), la rugosité de surface présente plus de variabilité. Par exemple, en l'absence de cire et de graphène, la rugosité atteint un pic de 9,7 µm pour une avance de 0,06 mm/rev, suggérant une interaction complexe entre la vitesse de coupe et l'avance.

Lorsqu'on considère l'ajout de graphène (0,25 % en poids), la rugosité de surface montre une réduction notable par rapport à la ligne de base (sans cire ni graphène). Par exemple, à 50 mm/min et une avance de 0,02 mm/rev, la rugosité chute à 2,4 µm, avec un écart type relativement faible (0,3 µm). Cela suggère que le graphène a un effet positif en réduisant la rugosité de surface, probablement en raison de ses propriétés lubrifiantes. À mesure que la

vitesse de coupe augmente à 100 mm/min, la rugosité de surface reste relativement stable, indiquant que la présence de graphène assure une amélioration constante dans différentes conditions de coupe.

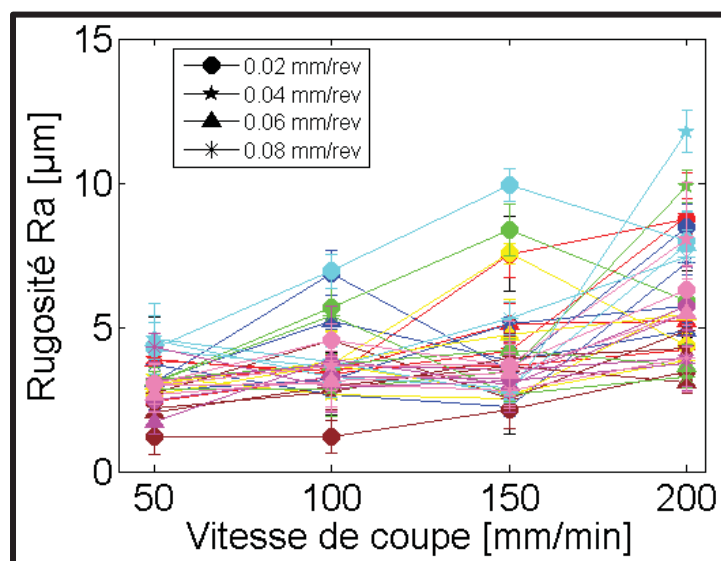


Figure 3.13 Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité à différentes vitesses d'avance et concentrations de cire et de graphène

En revanche, des concentrations plus élevées de graphène (2 % en poids) à 50 mm/min et 0,02 mm/rev ne conduisent pas nécessairement à une réduction supplémentaire de la rugosité. Par exemple, la rugosité avec une concentration de graphène de 2 % en poids et une avance de 0,02 mm/rev est de 3 µm, ce qui est plus élevé que la condition avec 0,25 % de graphène. Cela suggère qu'il pourrait y avoir une concentration optimale de graphène qui équilibre ses effets lubrifiants sans entraîner de rendements décroissants.

L'ajout de cire influence également la rugosité de surface. Avec 1 % en poids de cire et 0,25 % en poids de graphène, la rugosité est significativement réduite, avec l'une des valeurs les plus basses de rugosité enregistrée à 1,2 µm pour une vitesse de coupe de 50 mm/min et une avance de 0,02 mm/rev. L'écart type est relativement élevé (0,6 µm), ce qui pourrait indiquer une certaine variabilité dans le processus, mais dans l'ensemble, la combinaison de cire et de graphène semble produire des surfaces plus lisses par rapport aux autres conditions.

La variabilité de la rugosité de surface peut également être observée dans les valeurs d'écart type selon les différentes conditions. Des écarts types plus élevés, tels que $2\text{ }\mu\text{m}$ dans le cas sans cire ni graphène à 50 mm/min et $0,04\text{ mm/rev}$, suggèrent une plus grande inconsistance dans le processus d'usinage, ce qui pourrait être attribué à des facteurs tels que l'usure de l'outil ou l'hétérogénéité du matériau. À l'inverse, des écarts types plus faibles, tels que $0,1\text{ }\mu\text{m}$ pour 1% en poids de cire et 0% en poids de graphène à 150 mm/min et $0,08\text{ mm/rev}$, indiquent des résultats d'usinage plus cohérents.

Une analyse statistique plus détaillée, incluant une analyse de variance (ANOVA), pourrait être réalisée pour évaluer la signification de chaque facteur (vitesse de coupe, avance, concentrations de cire et de graphène) sur la rugosité de surface. De plus, des modèles de régression pourraient être développés pour quantifier les relations et interactions entre ces facteurs, offrant ainsi des perspectives supplémentaires sur les paramètres d'usinage optimaux. Par ailleurs, compte tenu de la variabilité indiquée par les écarts types, la réalisation d'expériences supplémentaires pourrait aider à évaluer la robustesse de ces résultats et à fournir des intervalles de confiance pour les tendances observées.

Le diagramme circulaire en 3D de la figure 3.14 met en évidence la contribution relative de quatre facteurs l'avance, la vitesse de coupe, la cire et le graphène sur la rugosité de surface. L'analyse indique que la vitesse de coupe joue le rôle le plus crucial, représentant $78,06\%$ de l'influence totale sur la rugosité de surface. Cela souligne que la vitesse de coupe exerce l'effet le plus significatif sur la qualité de la surface usinée, ce qui en fait un paramètre essentiel à optimiser lors du processus d'usinage.

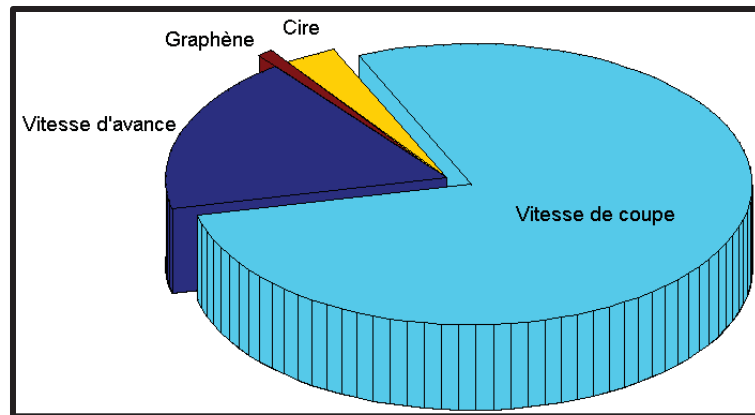


Figure 3.14 Contribution relative de l'avance, de la vitesse de coupe, de la cire et du graphène à la rugosité de surface

L'avance suit avec une contribution de 18,08%, ce qui indique que bien qu'elle soit moins influente que la vitesse, elle reste un facteur important à considérer pour obtenir une rugosité de surface optimale. En revanche, les concentrations de cire et de graphène ont des effets beaucoup plus limités, avec des contributions respectives de 2,99% et 0,87%. Cela suggère que ces additifs, bien qu'ils puissent offrir certains avantages, ont un impact relativement faible sur la rugosité de surface comparé à l'avance et à la vitesse de coupe.

En conclusion, l'analyse montre clairement que pour minimiser la rugosité de surface, il est essentiel de se concentrer principalement sur l'optimisation de la vitesse de coupe et de l'avance, tandis que l'ajustement des concentrations de cire et de graphène apporte des améliorations marginales.

3.4.1.2 Analyse de la rugosité de surface en fonction des concentrations de cire et de l'incertitude associée

L'analyse des résultats de rugosité de surface en fonction des concentrations de cire (0%, 1%, 2%) présentée dans la figure 3.15 révèle des tendances intéressantes et variables. Pour les échantillons sans cire (0%), la rugosité moyenne est la plus élevée parmi les trois groupes, avec une valeur de 5,1 μm (Fig. 3.15). Les résultats montrent une grande variabilité, allant d'une rugosité relativement basse de 4,1 μm à une valeur élevée de 5,1 μm , indiquant une certaine instabilité dans les conditions de coupe sans cire, probablement due à l'absence d'un agent

lubrifiant (Fig. 3.15). L'ajout de 1% de cire réduit la rugosité moyenne à 4,1 μm , montrant un effet positif de la cire sur la réduction de la rugosité (Fig. 3.15).

La réduction de la rugosité moyenne avec 1 % de cire indique que l'effet lubrifiant améliore la qualité de surface. Cependant, l'ajout de 2 % de cire n'apporte pas d'amélioration supplémentaire, la rugosité moyenne augmentant légèrement à 4,8 μm . Cela montre qu'une concentration supérieure à 1 % n'améliore pas systématiquement la qualité de surface et peut même avoir un effet négatif. Les valeurs de rugosité individuelles, comprises entre 4 μm et 5 μm , révèlent une variabilité accrue à des concentrations plus élevées de cire. Ces résultats suggèrent qu'une concentration optimale de cire se situe autour de 1 %, au-delà de laquelle les bénéfices en termes de rugosité deviennent limités, voire contre-productifs.

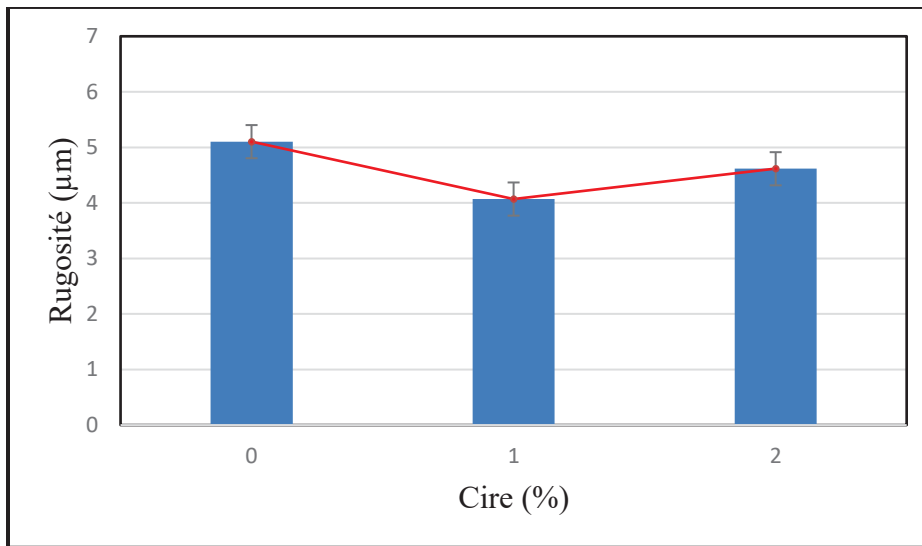


Figure 3.15 Rugosité en fonction de la concentration de cire, indépendamment des autres paramètres

3.4.1.3 Analyse de la rugosité de surface en fonction des concentrations de graphène et de l'incertitude associée

L'analyse du tableau comparant la rugosité de surface en fonction des concentrations de graphène (0%, 0,25% et 2%) révèle des variations intéressantes et complexes dans les valeurs de rugosité. Le tableau montre que la moyenne de la rugosité de surface diminue généralement

avec l'ajout de graphène, passant de 5,5 μm pour une concentration de 0% à 3,7 μm pour une concentration de 0,25% (Fig. 3.16). Cette réduction indique l'effet bénéfique du graphène, qui agit comme un lubrifiant et améliore la qualité de surface.

Cependant, à une concentration plus élevée de 2%, la rugosité moyenne augmente légèrement à 4,3 μm . Cela suggère qu'il peut y avoir une concentration optimale de graphène (0,25%) au-delà de laquelle les gains en termes de réduction de rugosité commencent à diminuer. Cette tendance pourrait s'expliquer par des effets de surcharge ou d'agglomération des particules de graphène à des concentrations plus élevées, ce qui nuirait à l'efficacité du processus de coupe.

Ces résultats indiquent que l'effet du graphène sur la rugosité de surface n'est pas linéaire et dépend fortement des conditions spécifiques d'usinage et de la concentration en graphène.

En résumé, bien que l'ajout de graphène améliore généralement la rugosité de surface, il est crucial de déterminer la concentration optimale pour maximiser cet effet.

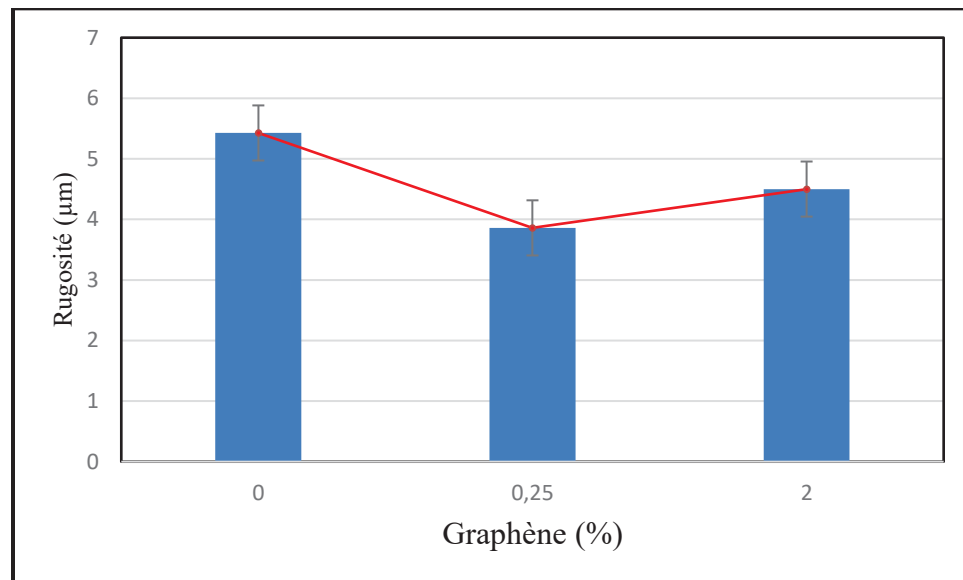


Figure 3.16 Rugosité en fonction de la concentration de graphène, indépendamment des autres paramètres

3.4.1.4 Analyse de l'impact des concentrations de cire et de graphène sur la rugosité moyenne

L'analyse de la rugosité en fonction de la concentration de cire et de graphène, indépendamment des autres paramètres, révèle des variations significatives dans la qualité de surface des échantillons. Ces résultats sont présentés à la figure 3.17 sous forme de diagramme à barres, illustrant les effets combinés de la cire et du graphène sur la rugosité moyenne.

Figure 3.17 montre que pour les échantillons sans cire, la rugosité moyenne diminue avec l'ajout de graphène. La rugosité passe de 5,5 pour 0% de graphène à 4,4 pour 2% de graphène, suggérant que le graphène agit comme un modificateur de surface efficace, améliorant la qualité de surface.

Les échantillons contenant 1% de cire montrent une réduction notable de la rugosité, avec un minimum de 2,9 pour 0,25% de graphène. Cette configuration semble optimale pour obtenir une surface lisse. Toutefois, lorsque la concentration de graphène est augmentée à 2%, la rugosité remonte légèrement à 4,4, indiquant qu'une concentration excessive de graphène peut diminuer les effets bénéfiques observés.

Pour les échantillons avec 2% de cire, la rugosité moyenne la plus élevée (5,7) est observée sans ajout de graphène, montrant que l'excès de cire seul peut dégrader la qualité de surface. L'ajout de graphène réduit la rugosité, atteignant des niveaux similaires à ceux des échantillons avec 1% de cire, ce qui souligne l'importance d'un équilibre entre la cire et le graphène pour optimiser la qualité de surface.

En conclusion, l'analyse des résultats met en évidence l'importance de l'ajustement précis des concentrations de cire et de graphène pour minimiser la rugosité de surface, indépendamment des autres paramètres d'usinage. Les meilleures performances sont obtenues avec 1% de cire et 0,25% de graphène, où la rugosité est la plus faible, soulignant l'importance de cet équilibre pour améliorer la qualité de surface.

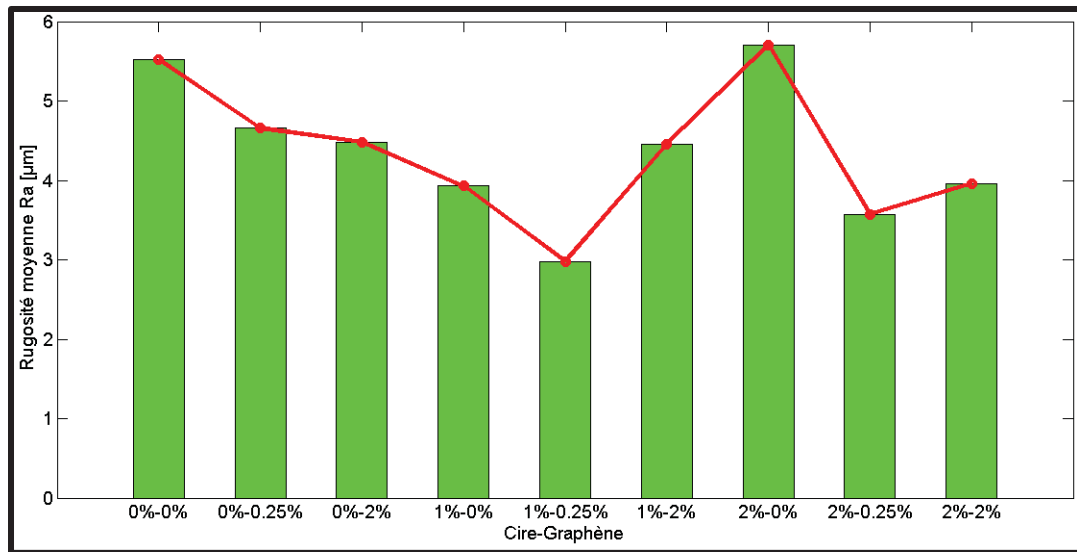


Figure 3.17 Évolution de la rugosité moyenne en fonction de la concentration de cire-graphène, indépendamment des autres paramètres

3.4.1.5 Analyse de la rugosité de surface en fonction des vitesses de coupe et de l'incertitude associée

L'analyse des résultats de la rugosité de surface en fonction des vitesses de coupe (50, 100, 150 et 200 mm/min) révèle des variations significatives de la rugosité moyenne à travers les différentes conditions de coupe. Comme le montre la figure 3.18, les distributions de rugosité sont plus larges pour les vitesses plus élevées, ce qui se traduit par une incertitude plus élevée dans les résultats de rugosité.

En moyenne, la rugosité de surface augmente avec la vitesse de coupe (Fig. 3.18). À 50 mm/min, les valeurs de rugosité se situent entre 1,2 μm et 3,6 μm , tandis qu'à 200 mm/min, elles atteignent une plage de 3,4 μm à 6,3 μm . Cela indique que des vitesses de coupe plus élevées tendent à générer des surfaces plus rugueuses, probablement en raison de l'augmentation de la température de coupe et de l'usure accrue de l'outil.

En conclusion, la vitesse de coupe a un impact significatif sur la rugosité de surface, les vitesses élevées entraînant une rugosité plus importante et une variabilité accrue des résultats.

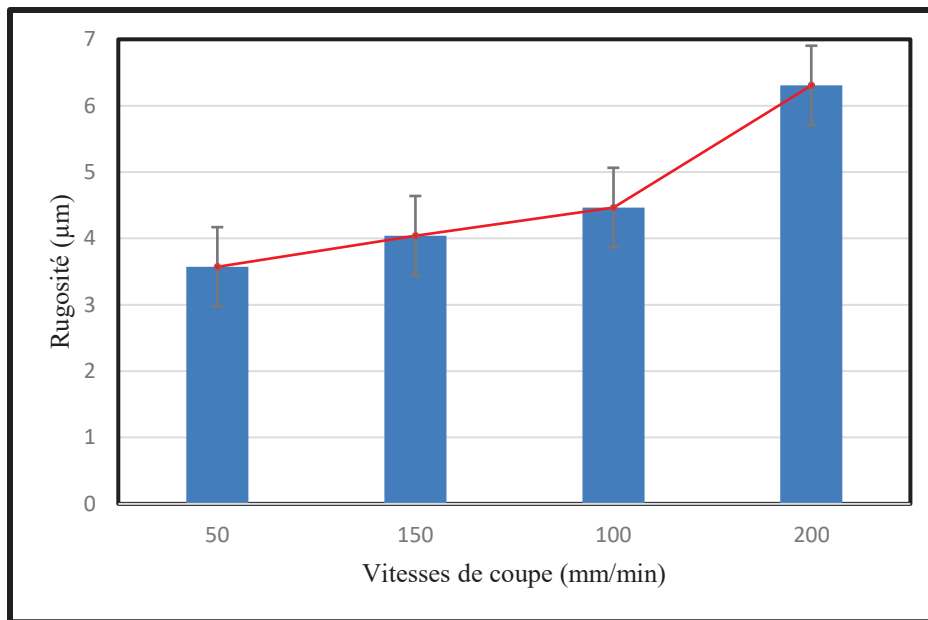


Figure 3.18 Rugosité en fonction des vitesses de coupe indépendamment des autres paramètres

3.4.1.6 Analyse de la rugosité de surface en fonction des vitesses d'avance et de l'incertitude associée

L'analyse des données de rugosité moyenne en fonction des vitesses d'avance, représentée dans la figure 3.19, révèle une relation inverse entre la vitesse d'avance et la rugosité de surface. À mesure que la vitesse d'avance augmente, la rugosité moyenne diminue, indiquant une amélioration progressive de la qualité de surface.

Pour la vitesse d'avance la plus faible, à 0,02 mm/rev, la rugosité moyenne est la plus élevée, atteignant 5 μm . Cela suggère qu'à des vitesses d'avance plus basses, les conditions de coupe entraînent une surface plus rugueuse, probablement en raison d'une interaction prolongée entre l'outil et le matériau, ce qui peut engendrer davantage de défauts de surface. En augmentant la vitesse d'avance à 0,04 mm/rev, la rugosité moyenne diminue à 4,5 μm , montrant une amélioration notable de la qualité de surface. Cette tendance se poursuit à 0,06 mm/rev, où la rugosité moyenne baisse encore à 4,1 μm , indiquant que l'augmentation de la vitesse d'avance

semble réduire le temps de contact entre l'outil et le matériau, limitant ainsi la déformation plastique et les défauts de surface.

Enfin, la vitesse d'avance la plus élevée, à 0,08 mm/rev, présente la rugosité moyenne la plus faible, avec une valeur de 4,1 μm . Ce résultat suggère que des vitesses d'avance plus élevées peuvent offrir des avantages significatifs en termes de qualité de surface, probablement en réduisant les forces de coupe et en minimisant l'usure de l'outil. Ces observations montrent une corrélation claire où l'augmentation de la vitesse d'avance conduit à une diminution de la rugosité, améliorant ainsi la qualité de la surface usinée.

Cependant, l'examen plus détaillé des résultats révèle une grande variabilité des mesures selon les conditions d'usinage. La figure 3.19 met en évidence cette dispersion, illustrant les incertitudes liées aux mesures pour chaque valeur d'avance. Par exemple, à une avance de 0,02 mm/rev, les rugosités varient de 1,2 μm à 5,4 μm , montrant une large plage de résultats. De même, à une avance de 0,08 mm/rev, les valeurs varient de 2,2 μm à 4,1 μm . Ces résultats suggèrent que l'impact de l'avance sur la rugosité de surface est non linéaire et dépend fortement des conditions spécifiques d'usinage.

Les valeurs élevées de rugosité observées à une avance de 0,06 mm/rev suggèrent que cet intervalle est plus sensible aux variations des paramètres d'usinage.

En résumé, l'avance est un paramètre complexe à optimiser, avec des effets variables sur la rugosité de surface. Les incertitudes observées soulignent l'importance d'une analyse statistique approfondie pour comprendre pleinement l'influence de ce paramètre sur la qualité de surface et orienter les choix de paramètres d'usinage pour optimiser les performances.

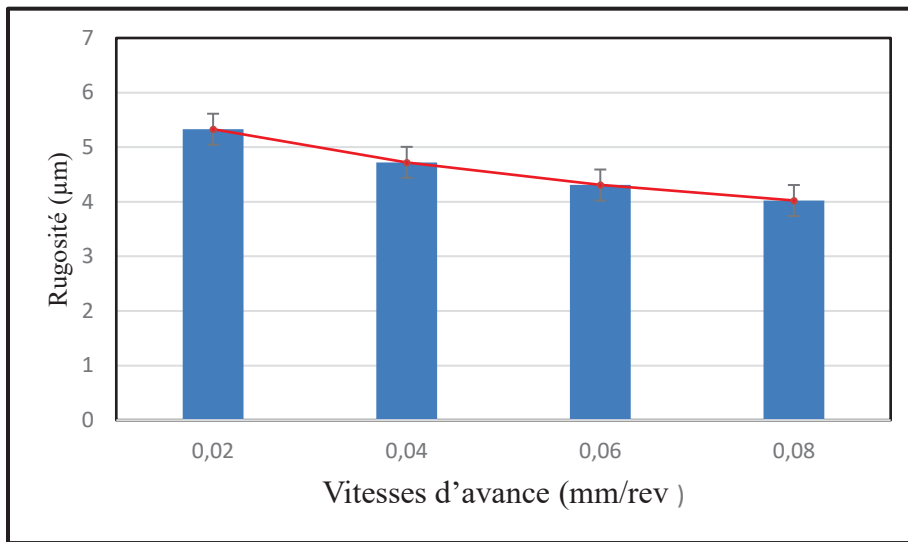


Figure 3.19 Rugosité en fonction des vitesses d'avance indépendamment des autres paramètres

3.4.2 Paramètres influents et équations de prédiction des rugosités

L'annexe VI présente les différentes méthodes et tests statistiques pour l'évaluation des rugosités de surface. Nous explorerons l'analyse de la variance (ANOVA), les tests de normalité, la régression, le test t de Student et le test de contribution. Cette exploration nous permettra d'obtenir une compréhension approfondie des facteurs influençant la qualité de surface diverses conditions d'usinage.

CHAPITRE 4

Effects of Wax and Graphene concentrations on Cutting Force in Drilling GFRP Composites

Mohamed Slamani^{1,2,*}, Siwar Jammel² & Jean-François Chatelain²

¹Laboratory of Materials and Mechanics of Structures (LMMS), Faculty of technology, University of M'sila, PO. Box. 166 Ichebilia 28000 M'Sila, Algeria

²Mechanical Engineering Department, École de Technologie Supérieure, 1100 Notre-Dame west, Montreal, Québec, Canada H3C 1K3

Paper submitted in the journal of Composite Materials, September 2024

4.1 Abstract

This study examines how varying concentrations of wax (0%, 1%, and 2%) and graphene (0%, 0.25%, and 2%) affect cutting forces during the drilling of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) composites. Wax is known to reduce friction and enhance lubrication, while graphene improves material strength and thermal conductivity, making it beneficial for machining. GFRP samples with different wax and graphene levels were created through a consistent mixing process. During drilling, cutting forces were measured, and normality tests confirmed that the cutting force data followed a normal distribution, allowing for the use of parametric statistical methods. Dummy variables were utilized to evaluate the significance of different concentrations in regression models, with t-tests assessing their impact on cutting force. These models—one for 0% graphene with varying wax and another for 0% wax with varying graphene—demonstrated high predictive accuracy, with R^2 values of 0.95 and 0.90, respectively. The analysis indicated that increased wax concentration reduces cutting force, whereas higher graphene concentration results in increased cutting forces.

Keywords: GFRP composites; wax concentration; graphene concentration; drilling; cutting force; regression modeling.

4.2 Introduction

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) composites have garnered significant attention in various industries due to their exceptional mechanical properties, such as high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, and design flexibility (Morampudi *et al.*, 2021) and (Sathishkumar, Satheeshkumar et Naveen, 2014). These materials offer substantial advantages over traditional metals and alloys, making them ideal for applications in aerospace, automotive, marine, and construction sectors where lightweight materials with high durability are crucial (Mohammadi *et al.*, 2022) and (Stickel et Nagarajan, 2012).

Machining processes are essential in shaping GFRP components to precise dimensions and specifications. However, machining these composites poses unique challenges compared to conventional materials due to their heterogeneous structure and anisotropic properties (Komanduri, 1997) and (Uhlmann *et al.*, 2016). The effectiveness of machining operations is often determined by parameters such as cutting force, which directly impacts tool wear (Slamani, Chatelain et Hamedanianpour, 2015) and (Azmi, 2015), surface finish quality (Slamani, Chatelain et Hamedanianpour, 2019) and (Prasanth *et al.*, 2022), and dimensional accuracy of machined parts (Gill, Gupta et Satsangi, 2013) and (Mohan, Ramachandra et Kulkarni, 2005).

To enhance the machinability and performance of GFRP composites, researchers have explored the use of additives such as waxes and graphene (El-Ghaoui, Chatelain et Ouellet-Plamondon, 2019). Waxes are commonly employed as lubricants and coolants during machining to reduce frictional heat generation and improve chip removal, thereby minimizing tool wear and surface defects (Chatelain *et al.*, 2019). Graphene, with its exceptional mechanical, thermal, and electrical properties, offers potential benefits in enhancing the stiffness, thermal conductivity, and wear resistance of GFRP composites (Veerakumar *et al.*, 2021) and (Papageorgiou, Kinloch et Young, 2016).

The concentration of these additives plays a crucial role in determining their effectiveness in modifying the machining behavior of GFRP composites. Studies have shown that variations in

wax and graphene concentrations can significantly influence cutting forces by altering material properties such as hardness, thermal conductivity, and interfacial adhesion within the composite matrix. Kuate-Togue et al. (Togue, Chatelain et Ouellet-Plamondon, 2018) investigated how additives impact cutting temperature in the machining of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP). Their findings revealed that adding wax, clay, and a wetting agent to the epoxy matrix can decrease the maximum cutting temperature by as much as 28% over a 300mm length of cut, compared to using a plain epoxy matrix. This temperature reduction helps avoid thermal damage and maintains the mechanical properties of the composite materials.

Mathieu et al. (Mathieu *et al.*, 2022) examined the effects of graphene in the epoxy matrix of CFRP on cutting temperature and machinability. They produced resin plates and CFRP laminates with varying graphene concentrations and conducted trimming experiments using a polycrystalline diamond (PCD) tool. Results showed minimal tool wear for both nanocomposites and CFRP plates. A 3%wt graphene addition reduced the cutting temperature increase by 30% and decreased feed forces by up to 43%.

Chatelain et al. (Chatelain *et al.*, 2019) studied the effects of various additives on cutting temperature and surface finish in trimming Glass Fiber Reinforced Polymers (GFRP). Five epoxy mixtures were tested: one without additives, one with a wetting agent (WA), one with WA and clay, one with WA and wax, and one with WA, clay, and wax. The findings indicated that wax particles notably lowered the cutting temperature by up to 30% and improved surface roughness by reducing the Ra value by up to 32%. The combination of clay and wax particles enhanced the machining performance of GFRP.

El-Ghaoui et al. (El-Ghaoui, Chatelain et Ouellet-Plamondon, 2019) studied the impact of incorporating 1 wt% graphene into the epoxy matrix of GFRP on its machinability. The process included mixing, sonicating, and producing unidirectional GFRP laminate with the modified epoxy. Cutting temperatures were recorded using thermocouples on a diamond-coated tool, and both cutting forces and surface roughness were measured. They found that the addition of graphene enhanced machining by lowering cutting temperatures, forces, and surface roughness without affecting the inter-laminar shear strength compared to GFRP without graphene.

Despite these advancements, there remains a gap in comprehensive understanding regarding the specific effects of wax and graphene concentrations on cutting force dynamics during machining operations.

This paper aims to bridge this gap by systematically investigating the effects of wax and graphene concentrations on cutting force in the machining of GFRP composites. Through experimental characterization and statistical analysis, this study quantifies the individual and combined impacts of varying wax and graphene concentrations on cutting forces. The findings provide valuable insights into optimizing machining parameters for enhanced productivity, efficiency, and quality in GFRP composite manufacturing.

4.3 Materials and methods

This section details the preparation of GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) samples with different concentrations of graphene and wax, as well as the procedures followed for their mixing, degassing, and drilling.

GFRP samples with varying concentrations of graphene and wax were fabricated using a consistent mixing process. The graphene (Graphene Black 0X) was provided by Nano-Xplore Inc., and the wax (Ceraflour 996) was supplied by BYK USA Inc. The graphene and wax particles were carefully weighed and incorporated into Marine 820 epoxy resin. The weight fractions of graphene and wax in the samples are presented in table 4.1 The values were selected based on literature results.

Tableau 4.1 Weight Fractions of the Samples

Sample Number	Wax (% by weight)	Graphene (% by weight)
1	0	0
2	0	0.25
3	0	2
4	1	0
5	1	0.25
6	1	2
7	2	0
8	2	0.25
9	2	2

A high-shear mixer (Silverson L5M-A, Silverson Machines, Inc., East Longmeadow, MA, USA) was used to mechanically mix, shear, and homogenize the graphene and wax particles in the epoxy resin. The mixing process was divided into six segments: four segments of 2 minutes each and two segments of 3 minutes each. The initial segment began at a low mixing speed of 1500 RPM, followed by successive segments at increasing speeds of 3000 RPM, 5000 RPM, 7500 RPM, and finally 10000 RPM. The following table illustrates the shear mixing sequence (Table 4.2).

Tableau 4.2 Shear Mixing Sequence

Mixing Speed (RPM)	Duration (minutes)
1500	2
3000	2
5000	2
7500	2
10000	3
10000	3

To ensure the mixture temperature did not exceed the glass transition temperature of the epoxy, an ice bath was used to maintain the temperature at a maximum of 30°C (slightly above room temperature). For the final two segments, the temperature was increased, which reduced the mixture viscosity, facilitating the degassing process.

Degassing was performed twice: once immediately after homogenizing all particles in the mixer, and a second time after adding the hardener. The first degassing step was critical due to the significant amount of air bubbles generated during high-shear mixing. The mixture was placed under vacuum for one hour at a maximum pressure of 29 inHg. The second degassing step, after adding the hardener, was conducted gently to avoid introducing air bubbles, followed by placing the mixture under vacuum for 15 minutes.

Among various processing methods, hand lay-up molding was chosen for its cost-effectiveness and practicality. The mold was prepared with a smooth plastic paper base, cleaned, and coated with a release agent. Layers of glass fibers were stacked, each layer impregnated with resin and compacted with a manual roller to eliminate air bubbles and wrinkles. This process was repeated for up to 16 layers, with alternating 90-degree orientations. A vacuum bag was applied

to improve quality, and the mold was placed in a press at 60 degrees with 5 mm plates to adjust the final thickness. The result was a 12 x 12 inch glass fiber sheet.

Drilling was performed using a three-axis CNC milling machine (Huron, K2X10) capable of reaching a maximum spindle speed of 28000 RPM and power of 40 kW. To measure the forces, a Kistler 9255B dynamometer table was used, and a camera was utilized to measure the temperature (Fig 4.1). A 5.5 mm diameter CVD-coated drill bit was used for the drilling tests.

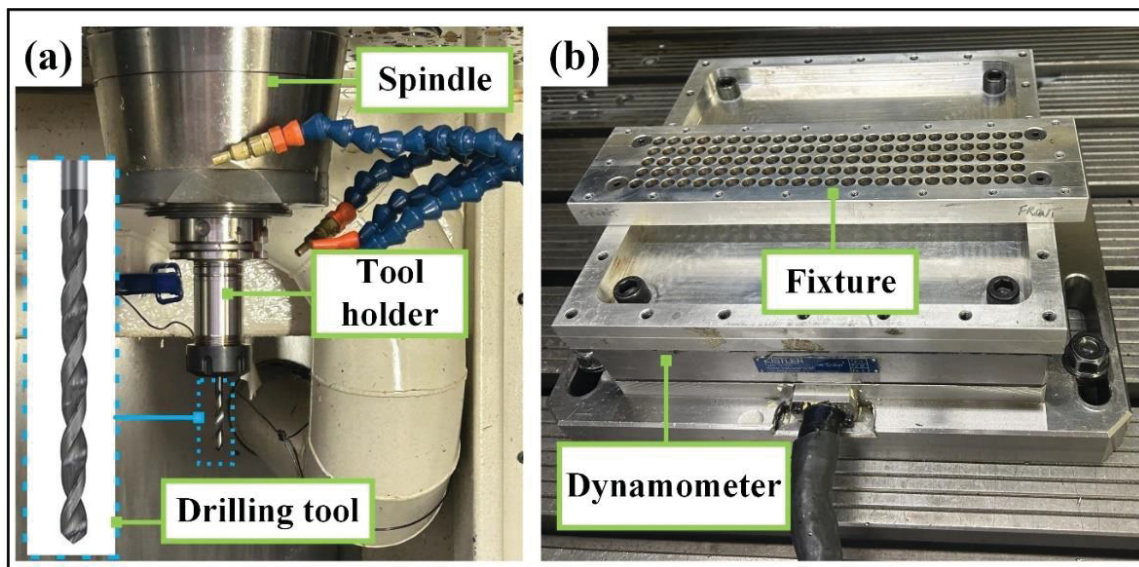


Figure 4.1 Experimental setup for the drilling process and cutting force measurement

The objective of this research is to analyze the impact of graphene and wax on forces and temperature. The cutting parameters for drilling the various plates are presented in the following table, which shows the recommended values for cutting speed and feed rate (Table 4.3).

Tableau 4.3 Cutting Parameters

Cutting Speed (V_c) (mm/min)	Feed Rate (f_z) (mm/rev)
50	0.02
100	0.04
150	0.06
200	0.08

Figure 4.2 represents the hole pathway, with three repetitions (T1, T2, and T3) performed for each level of each factor (parameter). The same pathway was followed for all samples.

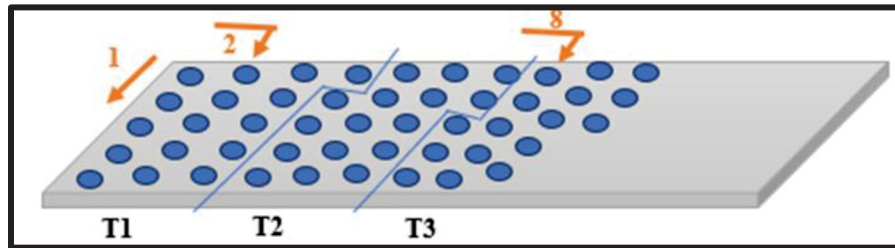


Figure 4.2 Pathway for Hole Drilling with Repetitions T1, T2, and T3

Cutting forces in each direction were recorded during drilling using the Kistler dynamometer and subsequently meticulously processed and analyzed.

4.4 Results and discussion

Figure 4.3 displays the initial 16 drilled holes conducted under varied cutting conditions for samples with 0% wax and 0% graphene concentrations, repeated in triplicate.

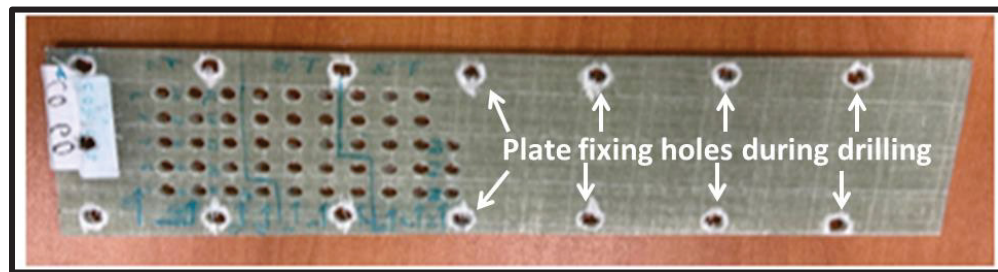


Figure 4.3 Initial 16 drilled holes repeated in triplicate under varied Cutting Conditions

The normality test is crucial in statistical analysis as it assesses whether a data set is well-modeled by a normal distribution. This is important because many statistical methods and tests, such as t-tests and ANOVA, assume that the data follows a normal distribution. Ensuring normality allows for accurate inferences and reliable conclusions from the data, making the normality test a fundamental step in validating the use of parametric statistical techniques.

Table 4.4 showcases the results of different normality tests applied to the cutting force data. Each test provides a test statistic, p-value, and a binary indicator of normality (1 for normal, 0 for not normal). Let's delve into the details of these results.

Tableau 4.4 Summary of Normality Test Results

Test Name	Test Statistic	p-value	Normality (1, 0 Normal)
KS Limiting Form	0.9473	0.3309	1
KS Marsaglia Method	0.9473	0.3142	1
Cramer-Von Mises Test	0.1182	0.0635	1
Shapiro-Francia Test	0.9839	0.0822	1
Jarque-Bera Test	1.6709	0.4337	1
D'Agostino & Pearson Test	2.3160	0.3141	1

Firstly, the Kolmogorov-Smirnov (KS) Limiting Form and KS Marsaglia Method both produced a test statistic of 0.9473 with p-values of 0.3309 and 0.3142, respectively. These p-values are both greater than the 0.05 significance level, indicating that the null hypothesis (that the data follows a normal distribution) cannot be rejected. Therefore, according to these tests, the data is considered normally distributed.

The Cramer-Von Mises Test resulted in a test statistic of 0.1182 and a p-value of 0.0635. Although this p-value is slightly above the 0.05 threshold, it still suggests that the data does not significantly deviate from a normal distribution, supporting the conclusion of normality.

The Shapiro-Francia Test yielded a test statistic of 0.9839 and a p-value of 0.0822. Since this p-value is also greater than 0.05, it indicates that the data is normally distributed. Similarly, the Jarque-Bera Test, with a test statistic of 1.6709 and a p-value of 0.4337, strongly suggests normality given the high p-value, far exceeding the 0.05 threshold.

Lastly, the D'Agostino & Pearson Test produced a test statistic of 2.3160 and a p-value of 0.3141. This p-value, being greater than 0.05, indicates that the data follows a normal distribution.

In conclusion, all the tests indicate that the data does not significantly deviate from a normal distribution, as all p-values are above the typical significance level of 0.05. Therefore, based on these tests, we can conclude that the data is normally distributed. These consistent results across multiple tests provide strong evidence for the normality of the data set, suggesting that normal distribution-based methods can be appropriately applied for further analysis.

After establishing the normality of the data, the next step involves analyzing the evolution of cutting forces under different testing conditions. This includes developing predictive models and performing comprehensive statistical analyses. Techniques such as ANOVA and t-tests are used to rigorously evaluate whether variations in wax and graphene concentrations significantly impact the cutting force amplitude in the GFRP composite. Dummy variables are employed to test the significance of different concentrations of wax and graphene. By incorporating these dummy variables into the regression model, we can compare the effects of various levels of wax and graphene against a reference group. This helps determine whether the observed differences in cutting force at different concentrations are statistically significant or due to random variation. This meticulous approach ensures that the insights and conclusions drawn from the data are accurate and reliable, providing a solid foundation for making informed decisions based on the results.

In Figure 4.4, the influence of the feed rate on the average cutting force is examined under varying cutting velocities and different concentrations of wax and graphene. The feed rate shows a strong correlation with the cutting force, evident by the increasing trend of the force with higher feed rates. For 0% wax and 0% graphene, the cutting force increases significantly across all cutting velocities as the feed rate increases from 0.02 mm/rev to 0.08 mm/rev. For instance, at 50 mm/min cutting velocity, the cutting force increases from approximately 14.68 N to 28.16 N. This trend is consistent across other cutting velocities (100 mm/min, 150 mm/min, and 200 mm/min), with slight variations in force magnitude. The standard deviation values are relatively low, indicating consistent measurements with minimal variability.

The addition of 0.25% graphene increases the cutting force across all feed rates and cutting velocities. At 50 mm/min cutting velocity and 0.08 mm/rev feed rate, the cutting force increases to around 36.73 N. The standard deviations are slightly higher than the 0% graphene

scenario, suggesting increased variability in cutting force measurements. With 2% graphene, the cutting force further increases, reaching around 35.47 N at 50 mm/min cutting velocity and 0.08 mm/rev feed rate. The standard deviations vary more significantly, indicating greater uncertainty in measurements. When 1% wax is added with 0.25% graphene, the cutting forces are slightly reduced compared to no wax. At 50 mm/min cutting velocity and 0.08 mm/rev feed rate, the cutting force is approximately 26.15 N, with lower standard deviations, suggesting more consistent measurements.

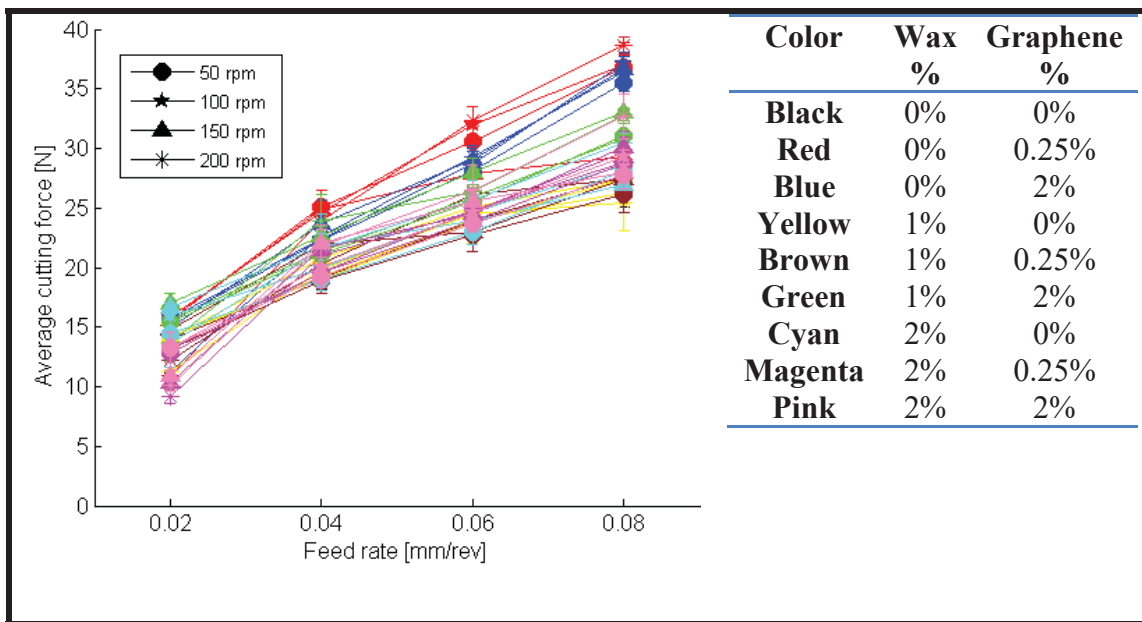


Figure 4.4 Effect of the feed rate on the average cutting force at different cutting velocities and wax and graphene concentrations

Higher cutting velocities generally result in slightly lower cutting forces at lower feed rates. For instance, with 0% wax and 0% graphene, at a feed rate of 0.02 mm/rev and a cutting velocity of 200 mm/min, the cutting force is around 14.66 N. The effect of cutting velocity diminishes at higher feed rates, where the feed rate predominantly influences the cutting force. The standard deviation values indicate measurement variability, with higher standard deviations, particularly with higher graphene concentrations, suggesting greater uncertainty in cutting force measurements. The consistency of the cutting force measurements is higher at lower graphene concentrations, as reflected by lower standard deviations.

In Figure 4.5, the impact of cutting velocity on the average cutting force is explored under various feed rates and different concentrations of wax and graphene. Unlike the feed rate, the cutting velocity shows a less pronounced effect on the cutting force. For 0% wax and 0% graphene, the cutting force slightly decreases with increasing cutting velocity at lower feed rates. For instance, at 0.02 mm/rev feed rate, the cutting force decreases from around 14.68 N at 50 mm/min to approximately 14.18 N at 100 mm/min. Higher feed rates diminish this effect, making cutting velocity less influential on cutting force.

The addition of 0.25% graphene shows similar trends, with the cutting force slightly decreasing with increasing cutting velocity, especially at lower feed rates. At 0.02 mm/rev feed rate and 50 mm/min cutting velocity, the cutting force is approximately 15.56 N. The force reduction is less pronounced at higher feed rates. With 2% graphene, the cutting force remains relatively stable with increasing cutting velocity, particularly at higher feed rates. At 0.08 mm/rev feed rate and 200 mm/min cutting velocity, the cutting force is around 36.41 N, with higher standard deviations indicating more variability in measurements. When 1% wax is added with 0.25% graphene, the cutting force decreases slightly with higher cutting velocities at lower feed rates. For instance, at 0.02 mm/rev feed rate and 50 mm/min cutting velocity, the cutting force is approximately 13.21 N. The effect diminishes at higher feed rates.

The cutting force increases significantly with higher feed rates across all cutting velocities. For instance, at 200 mm/min cutting velocity and 0.08 mm/rev feed rate, the cutting force is around 29.64 N for 2% graphene. The influence of feed rate is more substantial than cutting velocity on the cutting force. The standard deviations show variability in cutting force measurements, with higher standard deviations at higher graphene concentrations indicating greater uncertainty. Lower standard deviations at lower feed rates and cutting velocities suggest more consistent measurements with less uncertainty.

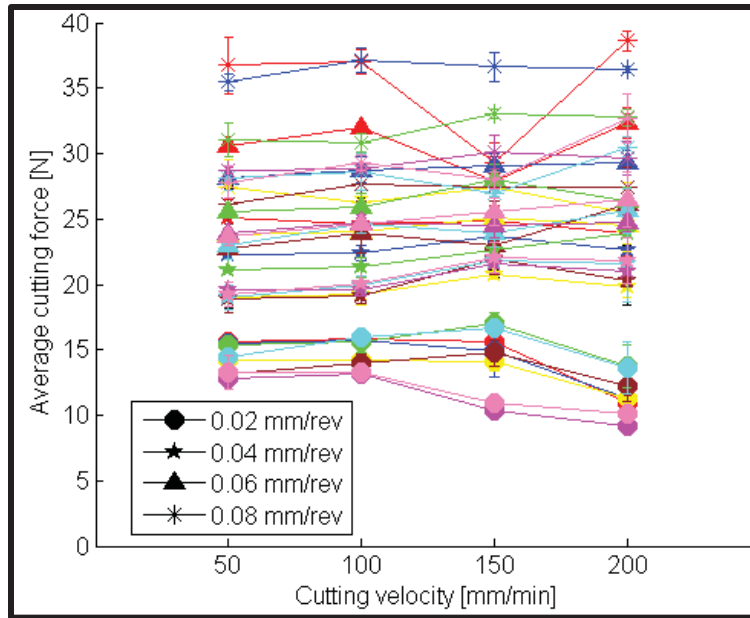


Figure 4.5 Effect of the cutting velocity on the average cutting force at different feed rates and wax and graphene concentrations

Figures 4.4 and 4.5 illustrate the dominant role of feed rate in determining the cutting force during machining, , while cutting velocity has a negligible influence. The addition of graphene generally increases the cutting force, while wax can mitigate this effect. The standard deviation analysis highlights the measurement consistency, with higher uncertainties associated with higher graphene concentrations. This analysis provides valuable insights for optimizing machining parameters to achieve desired cutting forces with minimal variability.

The analysis of percent contributions to average cutting force reveals insightful trends in how different variables affect the overall machining process. Figure 4.6 shows that among these factors, the feed rate emerges as the dominant influencer, contributing significantly with 94.9%. This indicates that variations in feed rate have the most substantial impact on altering cutting force levels, highlighting its critical role in shaping machining outcomes. In contrast, cutting velocity contributes minimally, accounting for only 0.1% of the average cutting force variation. While still a factor, its influence is notably minor compared to feed rate. Wax concentration follows with a 3.6% contribution, suggesting that changes in wax levels moderately affect cutting force. Graphene concentration contributes 1.4%, indicating a lesser but measurable impact on cutting force.

These findings underscore the importance of feed rate in machining processes, emphasizing its pivotal role in controlling cutting force dynamics. Understanding these contributions helps in optimizing machining operations by focusing on variables that most significantly affect performance and efficiency.

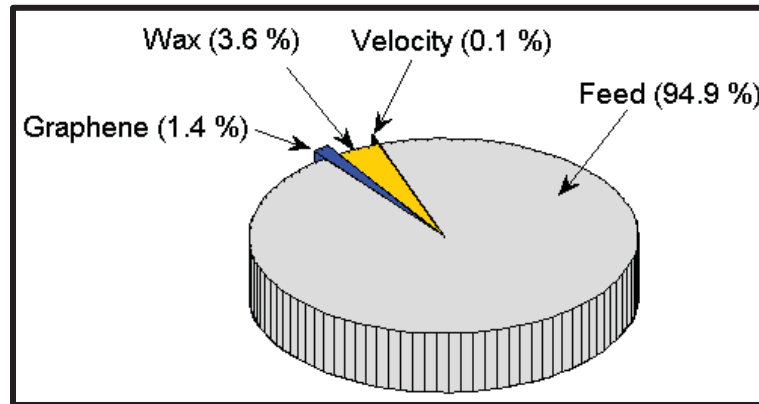


Figure 4.6 Percentage Contribution of Variables Tested on Average Cutting Force

Figure 4.7 demonstrates a clear trend where increasing the graphene concentration leads to a rise in average cutting force, regardless of the wax concentration, feed rate, or cutting velocity. Specifically, at 0% graphene concentration, the average cutting force is 21.77 N. When the graphene concentration is increased to 0.25%, the cutting force rises to 22.97 N. Further increasing the graphene concentration to 2% results in an average cutting force of 24.79 N. This progression suggests a positive correlation between graphene concentration and cutting force, with higher concentrations of graphene leading to higher cutting forces.

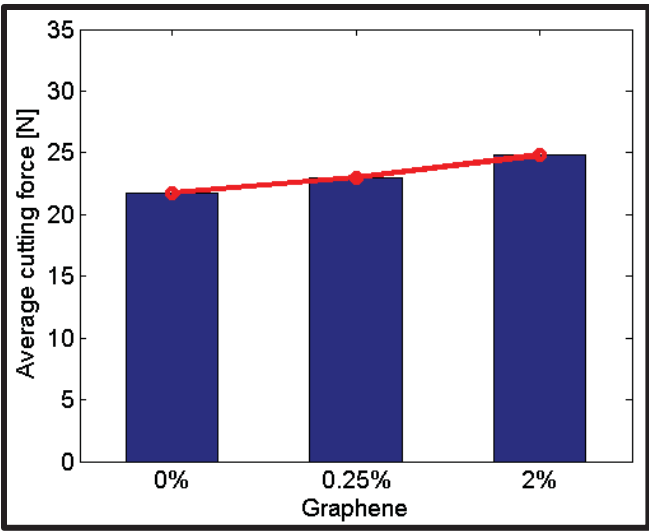


Figure 4.7 Effects of Graphene Concentration on Average Cutting Force

In contrast, Figure 4.8 shows that wax concentration exhibits an inverse relationship with cutting force. At 0% wax concentration, the average cutting force is 24.67 N. Increasing the wax concentration to 1% reduces the average cutting force to 22.08 N. Further increasing the wax concentration to 2% results in a slight additional decrease to 21.79 N. This trend indicates that higher wax concentrations tend to reduce the cutting force, demonstrating a negative correlation between wax concentration and cutting force.

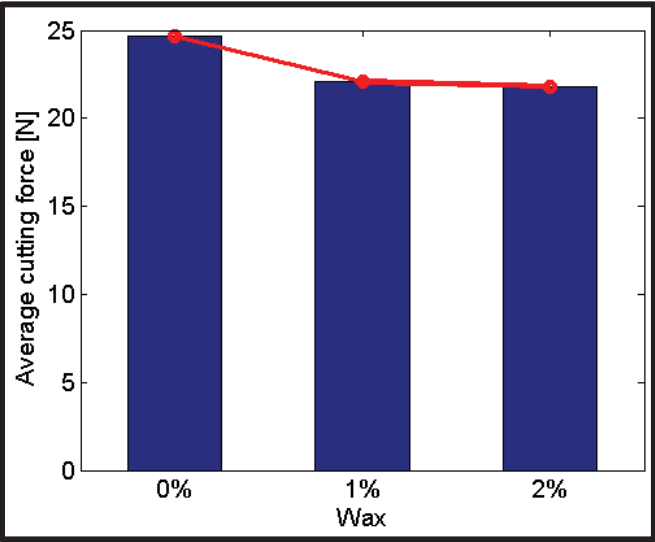


Figure 4.8 Effects of Wax Concentration on Average Cutting Force

Figure 4.9 shows that the feed rate has a substantial impact on the average cutting force, showing a strong positive correlation. At the lowest feed rate of 0.02 mm/rev, the average cutting force is 13.91 N. As the feed rate increases to 0.04 mm/rev, the cutting force jumps to 21.30 N. Further increasing the feed rate to 0.06 mm/rev results in an average cutting force of 25.81 N. At the highest feed rate of 0.08 mm/rev, the cutting force peaks at 30.36 N. This significant increase in cutting force with higher feed rates underscores the importance of feed rate as a major determinant of cutting force.

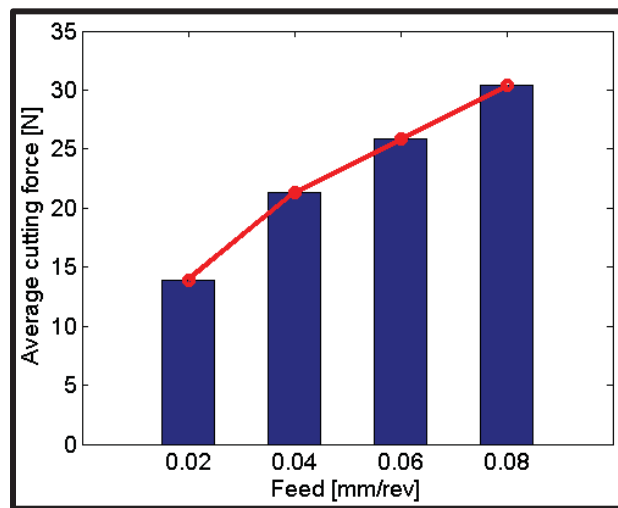


Figure 4.9 Effects of Feed Rate on Average Cutting Force

As shown in Figure 4.10, the effect of cutting velocity on average cutting force is relatively minimal. At a cutting velocity of 50 mm/min, the average cutting force is 22.44 N. Increasing the cutting velocity to 100 mm/min results in a slightly higher cutting force of 22.92 N. At 150 mm/min, the average cutting force is 23.10 N, and at 200 mm/min, it slightly decreases to 22.93 N. This minimal variation suggests that cutting velocity has a negligible impact on cutting force within the range studied, in contrast to the significant effect of feed rate.

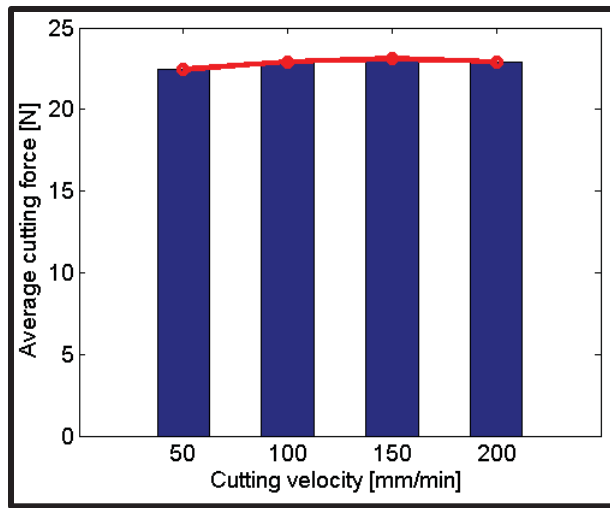


Figure 4.10 Effects of Cutting Velocity on Average Cutting Force

The interplay between wax and graphene concentrations presented in Figure 4.11 reveals nuanced effects on cutting force. The combination of 1% wax with 0% graphene results in an average cutting force of 21.03 N, and increasing the graphene concentration to 0.25% with 1% wax yields a slightly higher cutting force of 21.2 N. When both wax and graphene concentrations are 2%, the average cutting force is 21.41 N. However, combining 2% wax with 0.25% graphene results in an average cutting force of 21.81 N.

In scenarios with no wax, the effect of graphene becomes more pronounced. At 0% wax and 0% graphene, the average cutting force is 22.11 N. With 2% wax and 0% graphene, the cutting force slightly increases to 22.16 N. Interestingly, 1% wax with 2% graphene results in a higher cutting force of 24.012 N, while 0% wax with 2% graphene further increases the cutting force to 25.57 N. The highest average cutting force of 26.32 N is observed for the combination of 0% wax and 0.25% graphene.

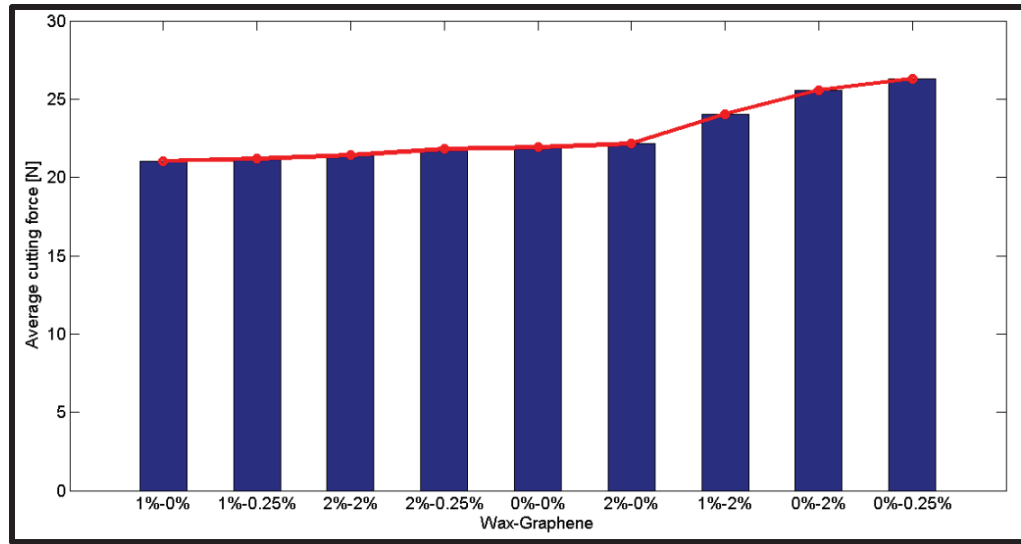


Figure 4.11 Effects of Wax-Graphene Concentrations on Average Cutting Force

Overall, these combinations highlight that while increasing graphene concentration generally raises the cutting force, higher wax concentration tends to moderate this effect, leading to a more complex interaction between these two factors. The trends show that the cutting force is influenced more significantly by the presence of graphene, especially at higher concentrations, but the presence of wax can mitigate this effect to some extent.

To further understand the impact of wax and graphene concentrations on the cutting force, it is essential to develop robust predictive models. These models allow us to quantify the effects of different concentrations and perform rigorous statistical analyses to determine their significance. By incorporating dummy variables into the regression models, we can compare various concentration levels against a reference group, thus providing deeper insights into the factors influencing cutting force.

Let's begin with the scenario where the wax concentration is 0% and the graphene concentrations are 0%, 0.25%, and 2%. The model equation for predicting the cutting force in this case is given by:

$$\hat{Y}_{0\%W} = 7.016 + 305.845 \times f - 0.0016 \times V_c + 4.21 \times D_1 + 3.466 \times D_2 \quad (4.1)$$

Here, $\hat{Y}_{0\%W}$ denotes the predicted cutting force, f represents the feed rate, V_c is the cutting velocity and D_1 and D_2 are dummy variables indicating different groups relative to a reference

(Group 1 , with 0% wax and 0% graphene). Table 4.5 outlines the dummy coding for the three concentration groups.

The coefficients 4.5 for D_1 and 3.466 for D_2 in equation (4.1) indicate the respective differences in cutting force between Group 2 and Group 1, and Group 3 and Group 1, relative to the reference group.

Tableau 4.5 Dummy Coding Variables with Three Levels

Concentration	D_1	D_2
Group 1 (W0% and G0%)	0	0
Group 2 (W0% and G0.25%)	1	0
Group 3 (W0% and G2%)	0	1

To assess the significance of these dummy variables, the t-test was employed, calculating t-values based on the formula:

$$t = \frac{b_j}{s(b_j)}$$

where, b_j are the coefficients and $s(b_j)$ are the standard errors of the regression coefficients, $j = 0, 1, \dots, p$.

The computed t-values for D_1 (4.88) and D_2 (4.02) were compared against critical t-values ($t_{\alpha/2; n-p-1}$) to determine statistical significance with $n - p - 1$ degree of freedom at $\alpha = 0.05$. Both t-values ($t_1=4.88$ and $t_2 = 40.2$) exceeded the critical value, indicating that the contributions of D_1 and D_2 to the model are statistically significant.

The positive coefficients for D_1 and D_2 suggest that Groups 2 and 3 experience higher cutting forces compared to Group 1. These findings are systematically significant, not merely random variations, reflecting the impact of changes in graphene concentration on cutting force. Specifically, Group 2 (0.25% graphene) and Group 3 (2% graphene) consistently exhibit higher cutting forces than the reference Group 1 (0% graphene), demonstrating a significant and measurable trend verified by the robustness of the t-test results.

Tableau 4.6 Evaluation of the dummy variable regression model parameters at varying Graphene levels, with 0% Wax

Model Adequacy				
R^2	$R^2_{Adjusted}$	MAE [N]	MAPE [%]	RMSE [N]
0.90	0.89	1.8	8.6	2.3
Model Summary				
Significant variables	Coefficients	Standard error	F-value	Marginal Contribution
Intercept	7.016	1.24	32.06	181.78
f	305.845	15.37	395.99	2244.99
V_C	-0.0016	0.006	0.067	0.38
W	4.21	0.84	24.97	141.57
G	3.466	0.84	16.95	96.11
ANOVA				
Effect	Sum of squares	D.F.	Mean squares	F-level
Regression (SSR)	2406.75	4	601.70	101.46
Residual (SSE)	255.11	43	5.93	
Total (TSS)	2661.87	47		

The metrics assessing model adequacy in Table 4.6 suggest a strong predictive performance of Equation 1 in estimating cutting force across different graphene concentrations, assuming 0% wax concentration. The R^2 value of 0.90 signifies that 90% of the variability in cutting force is explained by the model, highlighting its strong explanatory power. The Adjusted R^2 value of 0.89 adjusts for the number of predictors in the model, maintaining a high level of accuracy. The Mean Absolute Error (MAE) is 1.8 N, reflecting the average magnitude of errors between predicted and actual cutting forces. Additionally, the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 8.6% indicates that the average absolute error is 8.6% of the actual values, demonstrating the model's precision. The Root Mean Square Error (RMSE) of 2.3 N shows the standard deviation of the prediction errors, further confirming the model's reliability. Figure 12 depicts

the model's predictive accuracy through a comparison of measured versus predicted values, illustrating its strong adequacy.

The model summary also provides detailed insights into the significance and impact of each variable within the regression model. The feed rate (f) emerges as the most significant predictor, with a coefficient of 305.845, a low standard error of 15.37, and an exceptionally high F-value of 395.99. This underscores its substantial impact on the cutting force. Conversely, the cutting velocity (V_C) has a very small coefficient of -0.0016 and an insignificant F-value of 0.067, suggesting it has minimal to no effect on the cutting force. The dummy variable D_1 , representing Group 2 with 0.25% graphene concentration, has a coefficient of 4.21 and a significant F-value of 24.97, indicating a notable increase in cutting force compared to the reference group (0% graphene). Similarly, the dummy variable D_2 , representing Group 3 with 2% graphene concentration, has a coefficient of 3.466 and a significant F-value of 16.95, indicating an increase in cutting force compared to the reference group.

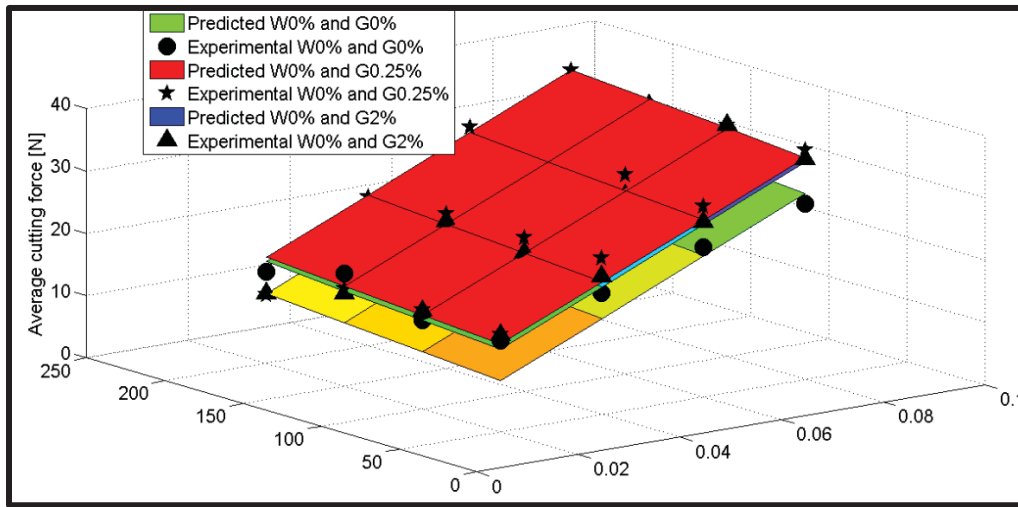


Figure 4.12 Response surface plot for predicted and experimental values at varying Graphene levels, with 0% Wax

The ANOVA section provides a detailed breakdown of the variance explained by the regression model and the residuals. The Regression Sum of Squares (SSR) is 2406.75, indicating the total variation explained by the model, with 4 degrees of freedom corresponding to the number of predictors. The Mean Squares for Regression, calculated by dividing SSR by

the degrees of freedom, is 601.70, and the F-level for Regression is 101.46, underscoring the overall significance of the regression model. The Residual Sum of Squares (SSE) is 255.11, representing the variation not explained by the model, with 43 degrees of freedom corresponding to the number of observations minus the number of predictors minus one. The Mean Squares for Residual, calculated by dividing SSE by the degrees of freedom, is 5.93.

Next, consider the scenario where the graphene concentration is 0% and the wax concentrations are 0%, 1%, and 2%. The model equation for predicting the cutting force in this case is:

$$\hat{Y}_{0\%G} = 10.66 + 217.6 \times f + 0.004 \times V_C - 1.07 \times D_1 + 0.051 \times D_2 \quad (4.2)$$

Analyzing Table 4.7 reveals a robust regression model (equation 4.2) for predicting cutting force based on varying wax levels, with graphene concentration at 0%. The model's R^2 value of 0.95 indicates that 95% of the variability in cutting force is explained by the predictors, demonstrating strong explanatory power. The adjusted R^2 value of 0.94 maintains this high level of accuracy even after adjusting for the number of predictors.

Tableau 4.7 Evaluation of the dummy variable regression model parameters at varying Wax levels, with 0% Graphene

Model Adequacy				
R^2	$R^2_{Adjusted}$	MAE [N]	MAPE [%]	RMSE [N]
0.95	0.94	0.82	4.24	1.10
Model Summary				
Significant variables	Coefficients	Standard error	F-value	Marginal Contribution
Intercept	10.66	0.62	292.92	419.34
f	217.60	7.72	793.82	1136.40
V_c	0.004	0.0031	2.19	3.14
W	-1.07	0.42	6.43	9.21
G	0.051	0.42	0.014	0.021
ANOVA				
Effect	Sum of squares	D.F.	Mean squares	F-level
Regression (SSR)	1191.90	4	297.985	221.38
Residual (SSE)	57.89	43	1.346	
Total (TSS)	1249.79	47		

The model's error metrics further underscore its precision. The Mean Absolute Error (MAE) is 0.82 N, reflecting the average magnitude of errors between predicted and actual cutting forces. The Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 4.24% indicates that the average absolute error is 4.24% of the actual values. The Root Mean Square Error (RMSE) of 1.10 N shows the standard deviation of the prediction errors, confirming the model's reliability. Additionally, the ANOVA results show an F-level of 221.38, indicating the adequacy of the model.

In examining the significant variables, the intercept is 10.66 N, which is highly significant with an F-value of 292.92. This value represents the baseline cutting force when all predictors are zero. The feed rate (f) is the most influential predictor with a coefficient of 217.60, a low

standard error of 7.72, and a substantial F-value of 793.82, highlighting its strong impact on cutting force. The cutting velocity (V_c) has a very small coefficient of 0.004 and an insignificant F-value of 2.19, suggesting minimal effect on cutting force.

The dummy variables in the model capture the effect of different wax concentrations relative to the reference group (0% wax). The coefficient for D_1 is -1.07, with an F-value of 6.43, indicating a significant reduction in cutting force for the group with 1% wax concentration compared to the reference group. The coefficient for D_2 is 0.051, with a very low F-value of 0.014, suggesting a negligible effect on cutting force for the group with 2% wax concentration.

Figure 4.13 illustrates the response surface plot for predicted and experimental values at varying wax levels, with 0% graphene concentration, providing a visual representation of the model's predictive capabilities across different experimental conditions.

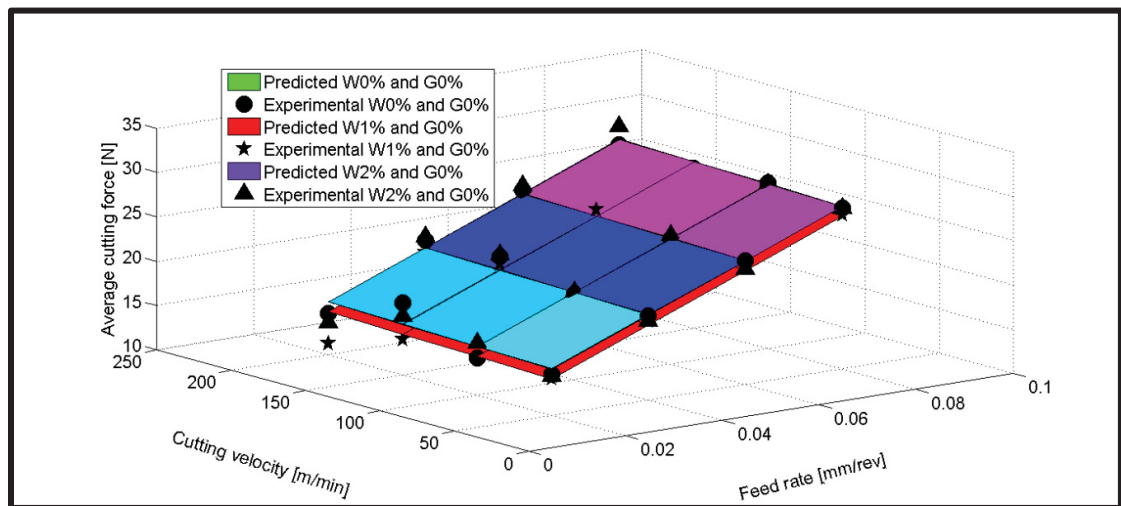


Figure 4.13 Response surface plot for predicted and experimental values at varying Wax levels, with 0% Graphene

4.5 Conclusion

This study provides valuable insights into the effects of wax and graphene concentrations on cutting forces during the machining of GFRP composites. It was found that increasing wax concentration significantly reduced cutting forces, presenting a viable approach to improve

machinability. In contrast, higher graphene concentrations consistently led to increased cutting forces, highlighting the need for careful management of its use.

Moreover, the analysis revealed that the feed rate emerged as the most influential factor on cutting force, contributing significantly more than cutting velocity. While cutting velocity had a minimal impact on cutting forces, the feed rate demonstrated a strong positive correlation, indicating its critical role in the machining process.

Statistical models, including ANOVA and regression analysis, confirmed the significance of these variables in predicting cutting force behavior. These findings underscore the importance of optimizing both feed rate and additive concentrations to enhance machining efficiency and precision in GFRP composites. Future work should explore additional factors and advanced modeling techniques to further refine these processes.

Future research could delve deeper into exploring the synergistic effects of wax and graphene additives on other mechanical properties of GFRP composites beyond cutting forces. Additionally, investigating optimal combinations of wax and graphene concentrations for specific machining applications would further refine process parameters and improve overall machining performance. By advancing these insights, manufacturers can capitalize on the unique benefits of wax and graphene in advancing composite material processing technologies.

CONCLUSION

En conclusion, cette étude a mis en lumière l'impact des additifs tels que la cire et le graphène sur les paramètres d'usinage des composites, en particulier la rugosité de surface, la force de coupe, la température et la porosité. Bien que les résultats n'aient pas toujours été ceux initialement attendus, ils révèlent une dynamique intéressante et ouvrent de nouvelles perspectives pour l'optimisation des processus d'usinage.

L'ajout de graphène, en particulier lorsqu'il est combiné avec 1 % de cire et 0,25 % de graphène, a permis d'obtenir une rugosité de surface de $4,9 \mu\text{m}$ sous les conditions de coupe de 200 mm/min et 0,08 mm/tr. Ce résultat met en évidence l'importance de l'association synergique entre ces deux additifs pour optimiser la qualité de surface. Par ailleurs, l'ajout de 0,25 % de graphène seul a permis d'obtenir une force de coupe maximale de 38,61 N, soulignant l'impact significatif du graphène dans l'amélioration des performances de coupe, même en l'absence de cire. Ces observations démontrent que le graphène, avec ou sans cire, joue un rôle déterminant dans l'amélioration des propriétés mécaniques et de la qualité des procédés de fabrication, ouvrant ainsi la voie à des applications industrielles innovantes et plus efficaces.

Concernant la température, des fluctuations notables ont été observées, avec une température maximale de $77,2^\circ\text{C}$ pour un mélange contenant 1 % de cire et 0 % de graphène. Ces fluctuations témoignent de la complexité de la structure moléculaire des composites et des interactions avec les paramètres d'usinage, soulignant l'importance de mieux comprendre ces facteurs pour optimiser les processus.

L'analyse de la porosité a, quant à elle, révélé que certaines combinaisons d'additifs, telles que C1G2 et C2G2, ont permis de réduire la porosité des composites, un facteur clé pour améliorer leurs performances mécaniques et garantir une meilleure durabilité.

En somme, cette étude contribue à l'avancement des connaissances sur l'optimisation des additifs et des paramètres d'usinage, tout en mettant en évidence l'importance de la personnalisation des conditions de coupe pour améliorer la qualité des composites. Les résultats, bien qu'inattendus dans certains cas, ouvrent de nouvelles pistes pour l'optimisation des matériaux composites et des processus de fabrication.

ANNEXE I

Code Matlab pour chercher la moyenne de force de coupe en régime transitoire

```
%function Data_Multiplot()
% Ouverture et tracé d'un fichier de données .mat
clear all
close all
clc
%Choix du fichier par l'utilisateur
[filename,pathname]=uigetfile({'*.mat','All Files (*.mat)'},'Choose a MAT
File','MultiSelect','off');
if iscell(filename)
    [UNUSE NB_FICHER] = size(filename);
else
    [UNUSE NB_FICHER] = size({filename});
End
if NB_FICHER~=1
    return
end
% Déterminer les paramètres de base de l'acquisition avec le fichier texte
[rep,fich,ext] = fileparts(filename);
FICHER_TXT = fullfile(pathname,[fich,'.txt']);
INFO_DATA = textread(FICHER_TXT,'%s','delimiter',';');
FE = str2num(INFO_DATA{1,1});
VC = str2num(INFO_DATA{2,1});
RPM = str2num(INFO_DATA{3,1});
AV = str2num(strrep(INFO_DATA{4,1},',','.'));
% Intro du fichier .mat
MAT_DATA = load(fullfile(pathname,filename));
```

```

NB_CHANNEL = length(MAT_DATA.NOM_CANAUX);
VEC_TEMPS = MAT_DATA.DATA_CANAUX(:,1);
LENGTH_SIGNAL = length(VEC_TEMPS);
% Correction du fichier de données
DATA_CORR = correction(MAT_DATA.DATA_CANAUX,VEC_TEMPS,FE);
FX_CORR = (DATA_CORR(:,2)+DATA_CORR(:,3));
FX = (MAT_DATA.DATA_CANAUX(:,2)+MAT_DATA.DATA_CANAUX(:,3));
FY_CORR = (DATA_CORR(:,4)+DATA_CORR(:,5));
FY = (MAT_DATA.DATA_CANAUX(:,4)+MAT_DATA.DATA_CANAUX(:,5));
FZ_CORR = DATA_CORR(:,6);
FZ = MAT_DATA.DATA_CANAUX(:,6);
% Utilisation de la fonction DECIMATE
FACT_DEC = 13;
VEC_TEMPS_DEC = decimate(VEC_TEMPS,FACT_DEC);
FX_DEC = decimate(FX_CORR,FACT_DEC);
FY_DEC = decimate(FY_CORR,FACT_DEC);
FZ_DEC = decimate(FZ_CORR,FACT_DEC);
figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(VEC_TEMPS,FX,'b');
ylabel('Forces X [N]')
set(gca, 'FontSize', 20, 'fontName','Times');
subplot(3,1,2)
plot(VEC_TEMPS,FY,'b');
ylabel('Forces Y [N]')
set(gca, 'FontSize', 20, 'fontName','Times');

```

```

subplot(3,1,3)
plot(VEC_TEMPS,FZ,'b');
ylabel('Forces Z [N]')
set(gca, 'FontSize', 20, 'fontName','Times');
sgtitle(fich);
%axis([1 6 -700 400]);
xlabel('Time (s)')
set(gca, 'FontSize', 20, 'fontName','Times');
figure(2)
subplot(3,1,1)
plot(VEC_TEMPS_DEC,FX_DEC,'b');
ylabel('Forces X [N]')
set(gca, 'FontSize', 20, 'fontName','Times');
subplot(3,1,2)
plot(VEC_TEMPS_DEC,FY_DEC,'b');
ylabel('Forces Y [N]')
set(gca, 'FontSize', 20, 'fontName','Times');
subplot(3,1,3)
plot(VEC_TEMPS_DEC,FZ_DEC,'b');
ylabel('Forces Z [N]')
set(gca, 'FontSize', 20, 'fontName','Times');
sgtitle(fich);
%axis([1 6 -700 400]);
xlabel('Time (s)')
set(gca, 'FontSize', 20, 'fontName','Times');
% Calculate the indices corresponding to the time range (1.5 to 3.3 seconds)

```

```
start_time = 1; % start time in seconds
end_time = 3; % end time in seconds
start_index = find(VEC_TEMPS_DEC >= start_time, 1);
end_index = find(VEC_TEMPS_DEC <= end_time, 1, 'last');
% Extract the z-axis data within the specified time range
z_data_range = FZ_DEC(start_index:end_index);
% Calculate the average of the extracted z-axis data
average_z_data = mean(z_data_range);
disp(['Average z-axis data between ', num2str(start_time), ' and ', num2str(end_time), '
seconds: ', num2str(average_z_data)]);
% Plotting code (if needed)
figure;
plot(VEC_TEMPS_DEC(start_index:end_index), z_data_range, 'b');
xlabel('Time (s)');
```

ANNEXE II

Code MATLAB pour tracer un graphe de trois surfaces différentes

```
% Provided data
SpindleSpeed = [50; 50; 50; 50; 100; 100; 100; 100; 150; 150; 150; 150; 200; 200; 200;
200];
feedRate = [0.02; 0.04; 0.06; 0.08; 0.02; 0.04; 0.06; 0.08; 0.02; 0.04; 0.06; 0.08; 0.02; 0.04;
0.06; 0.08];
rugosite1 = [64.600; 68.500; 61.633; 64.900; 68.667; 66.633; 64.933; 62.250; 66.133;
60.633; 68.367; 68.233; 57.450; 62.433; 55.700; 58.633];
rugosite2 = [70.26666667; 69.06666667; 68; 72.1; 67.66666667; 77.66666667; 73.9; 68.9;
60.86666667; 63.06666667; 73.33333333; 66.8; 55.43333333; 60.96666667; 59.7;
66.43333333]; % Adjusted length
rugosite3 = [67.23333333; 74.56666667; 73.7; 76.03333333; 69.73333333; 76.86666667;
76.43333333; 72.4; 67.1; 65.53333333; 73.03333333; 65.93333333; 60.7; 59.46666667;
58.83333333; 54.06666667];
% rugosite4 = [3.611066667; 3.995666667; 2.657733333; 3.018266667; 5.5532; 3.3154;
3.135733333; 3.035533333; 3.662866667; 3.7152; 3.396266667; 2.785933333;
6.286533333; 6.3856; 5.489333333; 3.249533333];
% Create a grid of values for feedRate and SpindleSpeed
[Xq, Yq] = meshgrid(linspace(min(feedRate), max(feedRate), 40),
linspace(min(SpindleSpeed), max(SpindleSpeed), 40));
% Interpolate Temperature values on the grid for each set of temperatures
Zq1 = griddata(feedRate, SpindleSpeed, rugosite1, Xq, Yq, 'cubic');
Zq2 = griddata(feedRate, SpindleSpeed, rugosite2, Xq, Yq, 'cubic');
Zq3 = griddata(feedRate, SpindleSpeed, rugosite3, Xq, Yq, 'cubic');
% Zq4 = griddata(feedRate, SpindleSpeed, rugosite4, Xq, Yq, 'cubic');
% Reverse the SpindleSpeed axis
Yq = max(Yq(:)) + min(Yq(:)) - Yq;
```

```

% Create a figure for the plots
figure;
% Plot the first temperature surface with a red color
surf(Xq, Yq, Zq1, 'EdgeColor', 'none', 'FaceColor', 'r', 'FaceAlpha', 0.7);
hold on;
% Plot the second temperature surface with a blue color (green)
surf(Xq, Yq, Zq2, 'EdgeColor', 'none', 'FaceColor', 'b', 'FaceAlpha', 0.7);
% Plot the third temperature surface with a yellow color (blue)
surf(Xq, Yq, Zq3, 'EdgeColor', 'none', 'FaceColor', 'y', 'FaceAlpha', 0.7);
% Plot the forth temperature surface with a yellow color
%surf(Xq, Yq, Zq4, 'EdgeColor', 'none', 'FaceColor', 'y', 'FaceAlpha', 0.7);
% Customize the plot
xlabel('Feed rate Vf (mm/min)');
ylabel('Spindle speed N(rpm)');
zlabel('rugosite ( $\mu\text{m}$ )');
colorbar;
colormap('jet');
% Reverse the labels on the spindle speed axis
set(gca, 'YTickLabel', flipud(get(gca, 'YTickLabel')));
% Add legends for the three temperature surfaces
legend('rugosite 1', 'rugosite 2', 'rugosite 3');
% , 'rugosite 4'
% Hold off to stop adding plots to the current figure
hold off;

```

ANNEXE III

Évaluation et analyse de la force de coupe Fz

Évaluation et analyse de la force de coupe Fz de la plaque GFRP (C=0% et G=0%)

Les tests statistiques, nous permettra de comprendre l'impact de vitesse de coupe et vitesse d'avance spécifiques sur la force de coupe crée pendant le processus de perçage de la plaque en GFRP sans cire et sans graphène. En examinant de près les variations de force de coupe, nous pourrons mieux optimiser les conditions d'usinage. Dans ce cas, on a appliqué le test de normalité d'Anderson-Darling. Après ce test on a trouvé que la valeur de p qui est égale à 0,698 est supérieure au seuil qui vaut 0,05. Par conclusion, donc les données analysées suivent une distribution normale. La figure AIII.1 présente la distribution des données trouvée après un test de normalité sur Minitab.

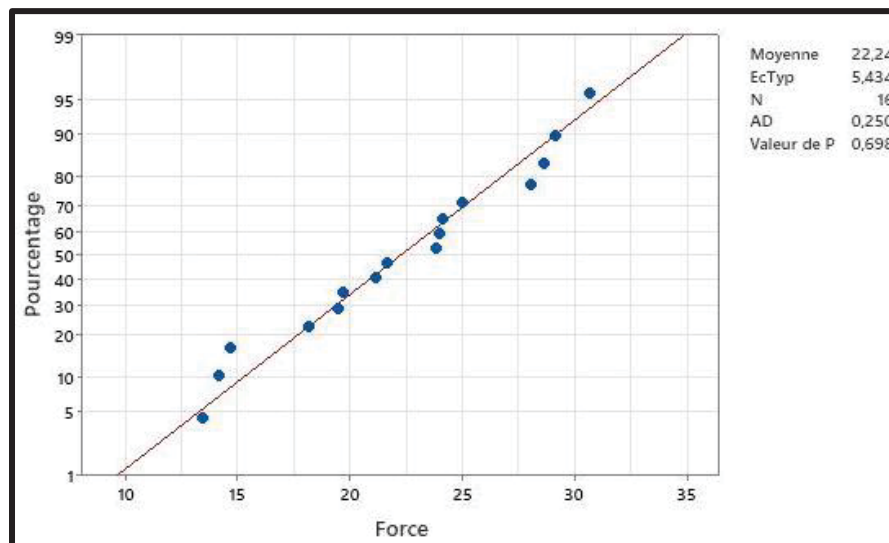


Figure AIII.1 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur Minitab

Pour évaluer l'impact significatif des variables indépendantes (vitesse de coupe et vitesse d'avance) sur la variable dépendante continue, la force, et sous l'hypothèse que notre modèle suit une distribution normale, on a opté pour deux approches d'analyse paramétriques : le test ANOVA et le test t de Student. Ces méthodes permettent de déterminer si les différences observées entre les groupes sont statistiquement significatives, aidant ainsi à identifier l'effet

des facteurs indépendants sur la force de coupe F_z de manière approfondie. Le test Anova appliqué provoque l'analyse de la variance ce qui prouve que la vitesse de coupe est significative sur la température de l'outil de coupe lors de perçage de la plaque GFRP à 0% de cire et de 0% de graphène. Le tableau ci-dessous (AIII.1) résume les résultats obtenus après l'Anova

Tableau AIII.1 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Vc	3	4,297	1,432	0,77	0,541
Nf	3	421,793	140,598	75,33	0,000
Erreur	9	16,798	1,866		
Total	15	442,888			

La probabilité de vitesse d'avance observé est égale à 0 qui est inférieur au seuil prédéfini qui vaut 0.05, ainsi que la valeur statistique de test principale F est égale à 75,33, cela indique qu'il existe des différences significatives entre la vitesse d'avance et la force de coupe. Cependant, au niveau de facteur de vitesse de coupe la valeur de p est supérieure à celle de seuil de signification statistique (valeur de $P=0,541$), ainsi que la valeur de F est très inférieur ($=0,77$) ce qui prouve qu'il n'y a probablement pas de signification entre la vitesse de coupe et la force de coupe.

D'après l'Anova l'équation de la force de coupe obtenue est :

$$\text{Force} = 22.236 - 0.422 V_{c50} - 0.577 V_{c100} + 0.679 V_{c150} + 0.320 V_{c200} - 7.131 N_{f0.02} - 1.754 N_{f0.04} + 1.987 N_{f0.06} + 6.897 N_{f0.08}$$

(AIII.1)

Cette équation ne peut être mise en œuvre dans des conditions réelles, car la force réelle, avant toute utilisation, n'est pas de 22,23 N.

Pour établir un modèle statistique plus réaliste et comprendre l'importance des combinaisons de valeurs des paramètres de coupe, on a réalisé une analyse de régression.

Pour évaluer l'ajustement du modèle aux données on a le coefficient de détermination $R^2 = 98,81\% \approx R_{Ajusté}^2 = 99,36\%$ ce qui suggère que le modèle est à la condition idéale.

De plus, l'équation trouvée après cette analyse est :

$$\text{Force} = 454.1N_f + 0.0904V_c - 1679N_f^2 - 0.000242V_c^2 - 0.368V_c V_f \quad (\text{AIII.2})$$

Les valeurs de P liée au facteurs appliqués lors de cette analyse, montre aussi que V_c et N_f provoquent une signification sur la force de coupe selon le modèle statistique.

Celle-ci est fourni par les résultats dans le tableau AIII.2:

Tableau AIII.2 Les résultats obtenus après le test de régression

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	8316,64	1663,33	494,49	0,000
Nf	1	95,08	95,08	28,27	0,000
Vc	1	23,55	23,55	7,00	0,023
Nf*Nf	1	10,17	10,17	3,02	0,110
Vc*Vc	1	8,29	8,29	2,46	0,145
Vc*Nf	1	4,78	4,78	1,42	0,259
Erreur	11	37,00	3,36		
Total	16	8353,64			

En résumé, à la suite de l'examen des résultats concernant la plaque GFRP sans cire et sans graphène, il est évident que la vitesse de coupe et la vitesse d'avance ont un impact significatif sur la force de coupe. Dans les sections suivantes, on va poursuivre les mêmes tests sur les différentes plaques.

Évaluation et analyse de force de coupe de la plaque GFRP (C=0% et G=0,25%)

Après le test de normalité sur les forces de coupe qu'on a trouvé que la valeur de p qui est égale à 0,209 est supérieure au seuil qui vaut 0,05. Donc, on peut conclure que les données

analysées suivent une distribution normale, donc on peut appliquer le test Anova. La figure suivante présente la distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab.

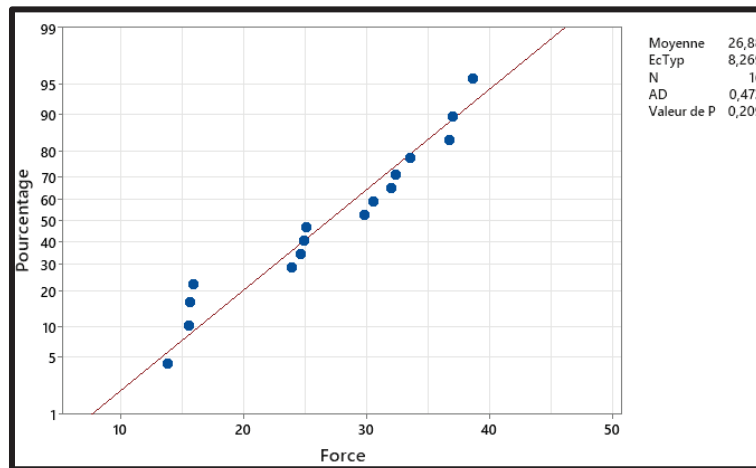


Figure AIII.2 La distribution des données trouvée après un test de normalité pour la plaque GFRP (C=0% et G=0,25%)

La valeur de P de vitesse d'avance vaut 0 donc la vitesse d'avance exerce une influence très importante sur la force de coupe. Le tableau AIII.3 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIII.3 Analyse de variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Nf	3	1004,12	334,708	178,95	0,000
Vc	3	4,78	1,592	0,85	0,500
Erreur	9	16,83	1,870		
Total	15	1025,74			

Ainsi que ces résultats donnent un modèle plus significatif et meilleur avec l'équation mathématique :

$$\text{Force} = 26.879 - 11.640N_{f0.02} - 2.249N_{f0.04} + 1.295N_{f0.06} + 9.594N_{f0.08} + 0.093V_{c50} + 0.526V_{c100} - 0.908V_{c150} + 0.289V_{c200}$$

(AIII.3)

Les paramètres significatifs sur les résultats de forces de coupe sont Nf^2 et N_f . Le tableau AIII.4 résume toutes les valeurs de p trouvé pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIII.4 Analyse de variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	12556,4	2511,28	955,77	0,000
Nf	1	242,5	242,49	92,29	0,000
Vc	1	2,0	2,03	0,77	0,399
Nf*Nf	1	46,9	46,88	17,84	0,001
Vc*Vc	1	1,2	1,17	0,45	0,518
Vc*Nf	1	0,1	0,06	0,02	0,881
Erreur	11	28,9	2,63		
Total	16	12585,3			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP sans cire et avec 0,25% de graphène, il est clair que tous les facteurs, à l'exception de Nf^2 et N_f , ont un impact significatif sur les forces de coupe.

Évaluation et analyse de force de coupe de la plaque GFRP (C=0% et G=2%)

Après le test de normalité sur les forces de coupe on a trouvé que la valeur de p qui est égale à 0,431 est supérieure au seuil qui vaut 0,05. Donc, on peut conclure que les données analysées suivent une distribution normale, donc on peut appliquer le test Anova. La figure A3.3 présente la distribution des données trouvé après un test de normalité sur MiniTab pour la plaque GFRP (C=0% et G=2%)

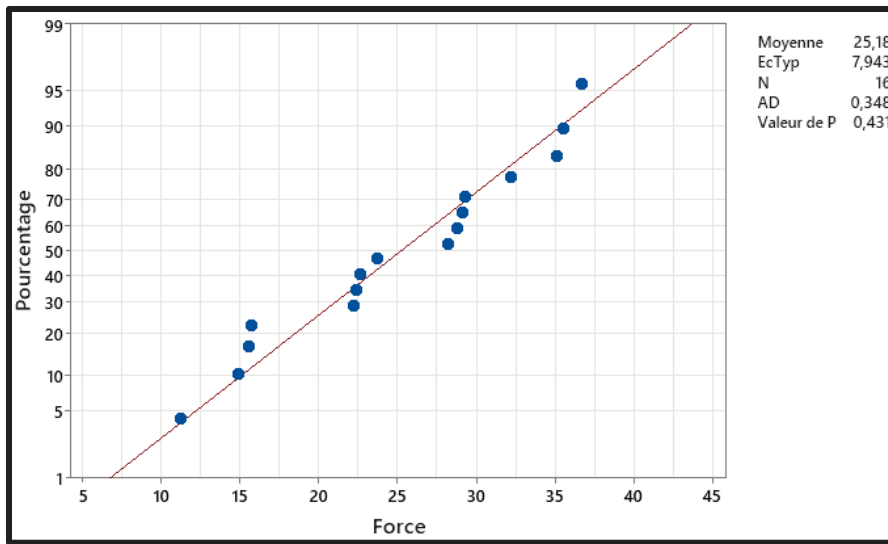


Figure AIII.3 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur Minitab pour la plaque GFRP (C=0% et G=2%).

La valeur de P de vitesse d'avance vaut 0 donc la vitesse d'avance exerce une influence très importante sur la force de coupe. Le tableau AIII.5 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIII.5 Analyse de variance après le test ANOVA

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Nf	3	920,281	306,760	135,22	0,000
Vc	3	5,637	1,879	0,83	0,511
Erreur	9	20,417	2,269		
Total	15	946,335			

Ainsi que ces résultats donnent un modèle plus significatif et meilleur avec l'équation mathématique :

$$\text{Force} = 587N_f + 0.0607V_c - 2605N_f^2 - 0.000270V_c^2 + 0.463V_cN_f \quad (\text{AIII.4})$$

D'après l'analyse de régression toutes les paramètres N_f^2 et N_f sont significatifs sur la force de coupe

Le tableau AIII.6 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIII.6 Analyse de variance après le test de régression

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	11059,3	2211,86	806,57	0,000
Nf	1	158,9	158,85	57,93	0,000
Vc	1	10,6	10,63	3,88	0,075
Nf*Nf	1	24,5	24,49	8,93	0,012
Vc*Vc	1	10,3	10,26	3,74	0,079
Vc*Nf	1	0,9	0,94	0,34	0,571
Erreur	11	30,2	2,74		
Total	16	11089,5			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP sans cire et avec 2% de graphène, il est clair que les facteurs N_f^2 et N_f ont un impact significatif sur la force de coupe.

Évaluation et analyse de force de coupe de la plaque GFRP (C=1% et G=0%)

Après le test de normalité sur les forces de coupe qu'on a. on a trouvé que la valeur de p qui est égale à 0,441 est supérieure au seuil qui vaut 0,05. Donc, on peut conclure que les données analysées suivent une distribution normale, donc on peut appliquer le test Anova. La figure AIII.4 présente la distribution des données trouvée après un test de normalité sur Minitab.

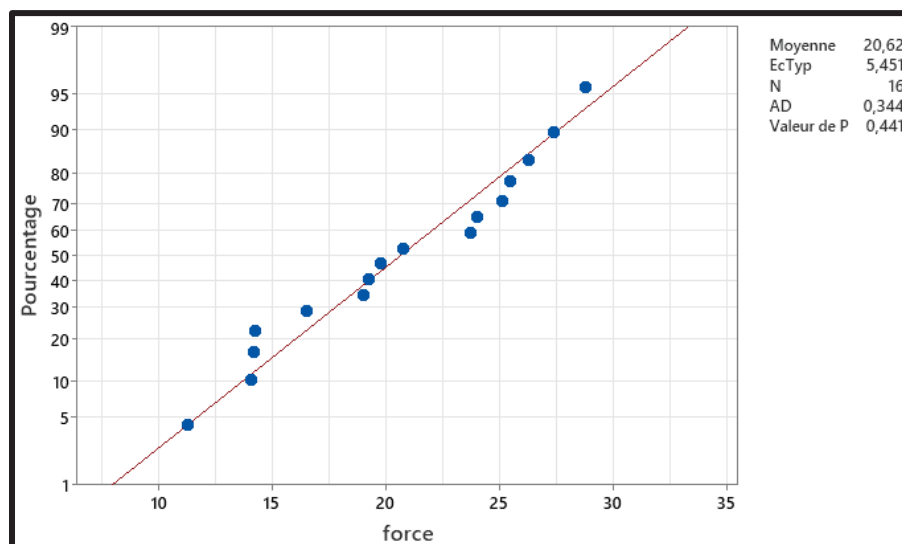


Figure AIII.4 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur Minitab pour la plaque GFRP (C=1% et G=0%).

La valeur de P de vitesse d'avance vaut 0 donc la vitesse d'avance exerce une influence très importante sur la force de coupe. Le tableau suivant présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIII.7 Analyse de variance (C=1% ET G= 0%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Nf	3	384,59	128,197	41,83	0,000
Vc	3	33,54	11,181	3,65	0,057
Erreur	9	27,58	3,065		
Total	15	445,72			

Ainsi que ces résultats donnent un modèle plus significatif et meilleur avec l'équation mathématique :

$$\text{Force} = 421.7N_f + 0.1215V_c - 1649N_f^2 - 0.000480V_c^2 - 0.281V_cN_f \quad (\text{AIII.5})$$

Selon l'analyse de régression, tous les paramètres ont une incidence significative sur la force de coupe, à l'exception de V_c*N_f et N_f^2 .

Le tableau AIII.8 résume toutes les valeurs de p trouvé pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIII.8 Analyse de variance après le test de régression de la plaque (C=1% et G=0%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	7201,84	1440,37	344,88	0,000
Nf	1	82,00	82,00	19,63	0,001
Vc	1	42,51	42,51	10,18	0,009
Nf*Nf	1	9,81	9,81	2,35	0,154
Vc*Vc	1	32,47	32,47	7,78	0,018
Vc*Nf	1	2,78	2,78	0,67	0,432
Erreur	11	45,94	4,18		
Total	16	7247,78			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP 1% cire et avec 0% de graphène, il est clair que tous les facteurs ont un impact significatif sur la force de coupe en excluent la combinaison de V_c*N_f et N_f^2 .

Évaluation et analyse de force de coupe de la plaque GFRP (C=1% et G=0,25%)

À la suite du test de normalité effectué sur les forces de coupe, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,463, qui dépasse le seuil de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données analysées suivent une distribution normale, ce qui nous permet d'appliquer le test ANOVA. La figure AIII.5 illustre la distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab.

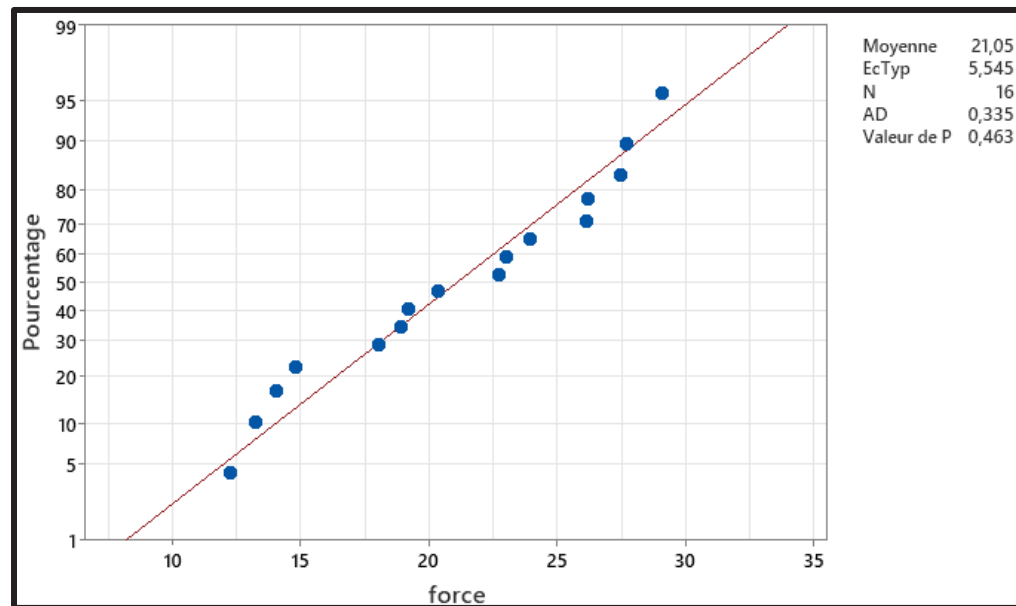


Figure AIII.5 La distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=1% et G=0.25%).

La valeur de P de vitesse d'avance vaut 0 et pour la vitesse de coupe vaut 0,256. La valeur de valeur de coupe est supérieure à la seuil 0,05. Donc la valeur de coupe n'exerce pas une influence sur la force de coupe. Le tableau AIII.9 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIII.9 Analyse de variance après le test de normalité de la plaque (C=1% et G=0,25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Nf	3	443,440	147,813	115,16	0,000
Vc	3	6,177	2,059	1,60	0,256
Erreur	9	11,552	1,284		
Total	15	461,169			

Ainsi, on a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Force} = 486.1N_f + 0.0577V_c - 2405N_f^2 - 0.000175V_c^2 - 0.011V_cN_f \quad (\text{AIII.6})$$

Selon l'analyse de régression, tous les paramètres sauf V_c^2 , $V_c * N_f$ et V_c ont une incidence significative sur la force de coupe.

Le tableau AIII.10 résume toutes les valeurs de p trouvé pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIII.10 Analyse de variance après le test de régression de la plaque (CK=1% et G=0,25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	7526,65	1505,33	729,21	0,000
Nf	1	108,96	108,96	52,78	0,000
Vc	1	9,59	9,59	4,65	0,054
Nf*Nf	1	20,88	20,88	10,11	0,009
Vc*Vc	1	4,32	4,32	2,09	0,176
Vc*Nf	1	0,00	0,00	0,00	0,963
Erreur	11	22,71	2,06		
Total	16	7549,36			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP 1% cire et avec 0,25% de graphène, il est clair que tous les facteurs ont un impact significatif sur la force de coupe en excluant la vitesse d'avance et V_c^2 , $V_c * N_f$ et V_c .

Évaluation et analyse de force de coupe de la plaque GFRP (C=1% et G=2%)

À la suite du test de normalité effectué sur les forces de coupe, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,403, qui dépasse le seuil de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données analysées suivent une distribution normale, ce qui nous permet d'appliquer le test ANOVA. La figure AIII.6 illustre la distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab.

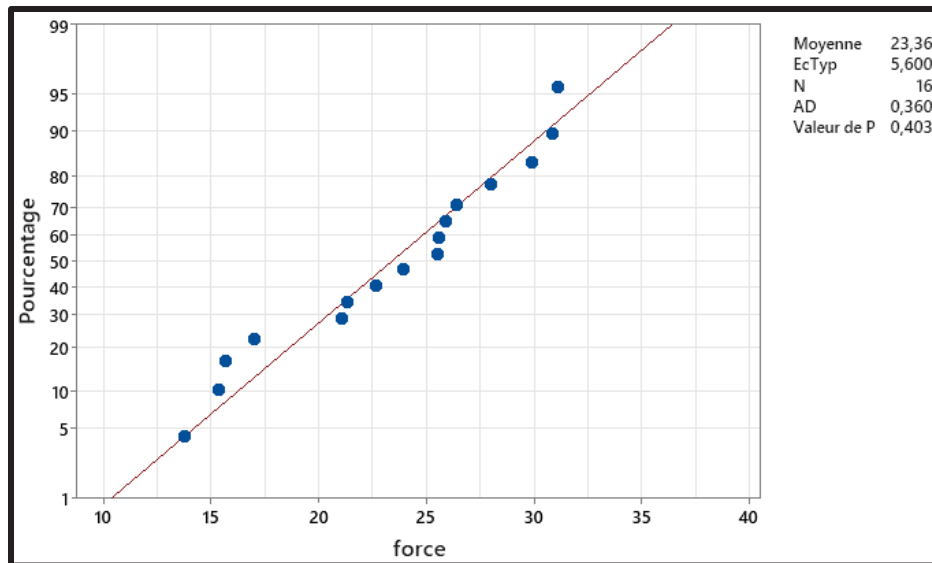


Figure AIII.6 La distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=1% et G=2%)

La valeur de P de vitesse de coupe vaut 0.491 et pour la vitesse d'avance vaut 0. La valeur de vitesse de coupe est supérieure à la seuil 0,05. Donc la vitesse de coupe n'exerce pas une influence sur la force de coupe. Le tableau AIII.11 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIII.11 Analyse de variance de la plaque (C=1% et G=2%) après le test de normalité

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Nf	3	436,415	145,472	49,78	0,000
Vc	3	7,641	2,547	0,87	0,491
Erreur	9	26,300	2,922		
Total	15	470,356			

Ainsi, on a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Force} = 573.5N_f + 0.0882V_c - 2724N_f^2 - 0.000251V_c^2 - 0.558V_cN_f \quad (\text{AIII.7})$$

Selon l'analyse de régression, tous les paramètres ont une incidence significative sur la force de coupe sauf $N_f \cdot V_c$.

Le tableau AIII.12 résume toutes les valeurs de p trouvé pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIII.12 Analyse de variance de la plaque (C=1% et G=2%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	66177,1	13235,4	162,62	0,000
Nf	1	1130,8	1130,8	13,89	0,003
Vc	1	1006,3	1006,3	12,36	0,005
Nf*Nf	1	563,8	563,8	6,93	0,023
Vc*Vc	1	544,3	544,3	6,69	0,025
Nf*Vc	1	176,3	176,3	2,17	0,169
Erreur	11	895,3	81,4		
Total	16	67072,4			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP 1% cire et avec 2% de graphène, il est clair que tous les facteurs ont un impact significatif sur la force de coupe sauf Nf*Vc.

Évaluation et analyse de force de coupe de la plaque GFRP (C=2% et G=0%)

À la suite du test de normalité effectué sur les forces de coupe, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,372, qui dépasse le seuil de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données analysées suivent une distribution normale, ce qui nous permet d'appliquer le test ANOVA. La figure AIII.7 illustre la distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab.

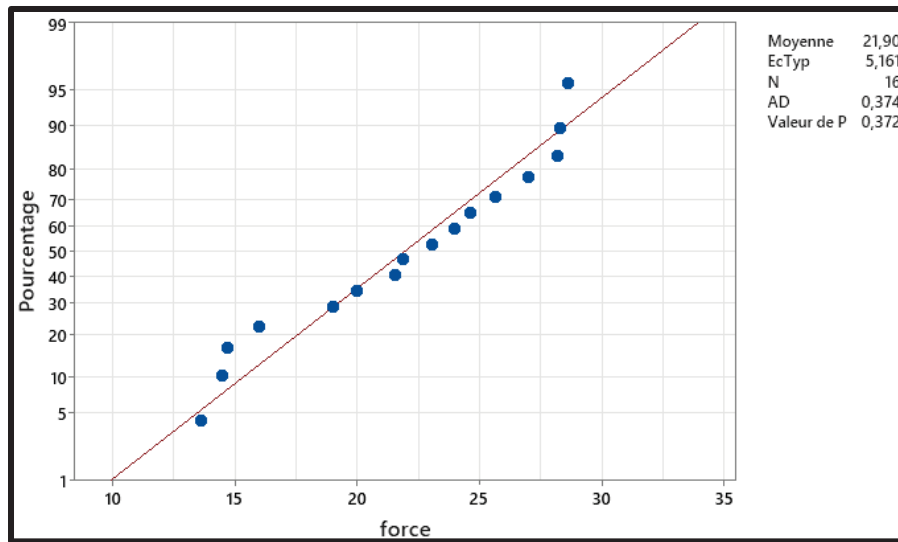


Figure AIII.7 La distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=2% et G=0%).

La valeur de P de vitesse d'avance vaut $0 \leq 0,05$. Donc la vitesse d'avance exerce une influence sur la force de coupe. Le tableau AIII.13 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIII.13 Analyse de variance après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=2% et G=0%).

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Nf	3	386,257	128,752	113,71	0,000
Vc	3	3,151	1,050	0,93	0,466
Erreur	9	10,191	1,132		
Total	15	399,598			

Ainsi, on a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Force} = 483.3N_f + 0.0901V_c - 2218N_f^2 - 0.000273V_c^2 - 0.293V_cN_f \quad (\text{AIII.8})$$

Selon l'analyse de régression, tous les paramètres ont une incidence significative sur la force de coupe sauf le paramètre $V_c * N_f$

Le tableau AIII.14 résume toutes les valeurs de p trouvé pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIII.14 Analyse de variance de la plaque (C=2% et G=0%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	8054,78	1610,96	1001,62	0,000
Nf	1	107,68	107,68	66,95	0,000
Vc	1	23,41	23,41	14,56	0,003
Nf*Nf	1	17,76	17,76	11,04	0,007
Vc*Vc	1	10,50	10,50	6,53	0,027
Vc*Nf	1	3,02	3,02	1,88	0,198
Erreur	11	17,69	1,61		
Total	16	8072,48			

En conclusion, après avoir étudié les résultats concernant la plaque GFRP avec 2% de cire et 0% de graphène, il est évident que tous les facteurs ont un impact significatif sur la force de coupe, à l'exception de $Vc * Nf$.

Évaluation et analyse de force de coupe de la plaque GFRP (C=2% et G=0.25%)

À la suite du test de normalité effectué sur les forces de coupe, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,136 qui est supérieur seuil de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données analysées suivent une distribution normale, ce qui nous permet d'appliquer le test ANOVA. La figure AIII.8 illustre la distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab.

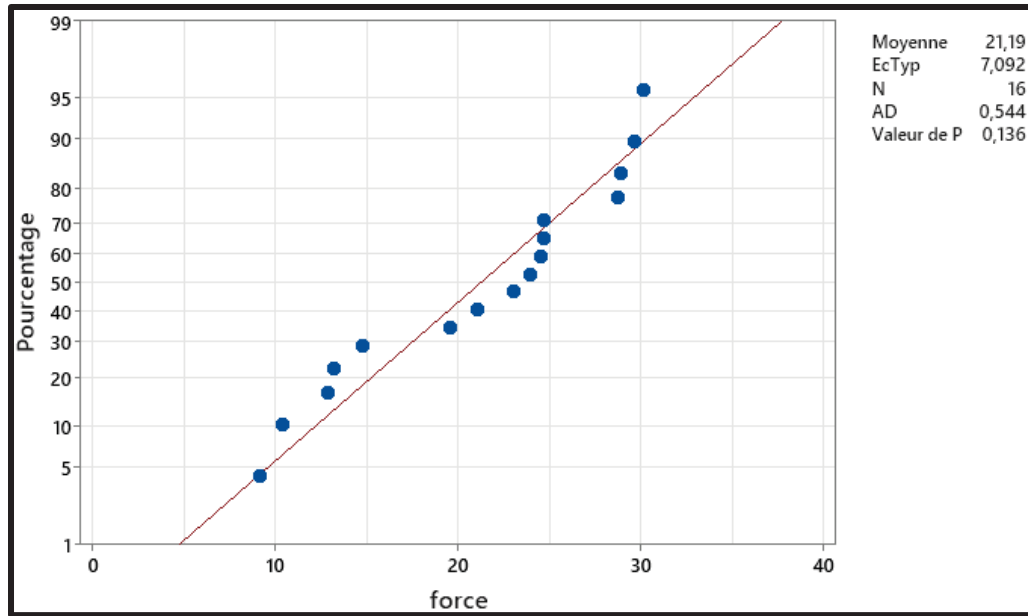


Figure AIII.8 La distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=2% et G=0,25%).

On a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Force} = 630N_f - 0.013V_c - 3501N_f^2 - 0.000055V_c^2 + 0.206V_cN_f \quad (\text{AIII.9})$$

Ainsi que le tableau AIII.15 résume toutes les valeurs de p trouvé pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIII.15 Analyse de variance de la plaque (C=2% et G=0,25%) après le test de normalité

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	7887,91	1577,58	331,74	0,000
Nf	1	182,82	182,82	38,44	0,000
Vc	1	0,00	0,00	0,00	0,976
Nf*Nf	1	44,23	44,23	9,30	0,011
Vc*Vc	1	0,43	0,43	0,09	0,769
Vc*Nf	1	1,49	1,49	0,31	0,586
Erreur	11	52,31	4,76		
Total	16	7940,22			

En conclusion, après avoir étudié les résultats obtenus après le test de régression concernant la plaque GFRP avec 2% de cire et 0,25% de graphène, il est évident que tous les facteurs ont un impact significatif sur la force de coupe, à l'exception de Vc^2 , Vc et $Vc * Nf$.

Évaluation et analyse de force de coupe de la plaque GFRP (C=2% et G=2%)

À la suite du test de normalité effectué sur les forces de coupe, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,564, qui dépasse le seuil de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données analysées suivent une distribution normale, ce qui nous permet d'appliquer le test ANOVA. La figure AIII.9 illustre la distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab.

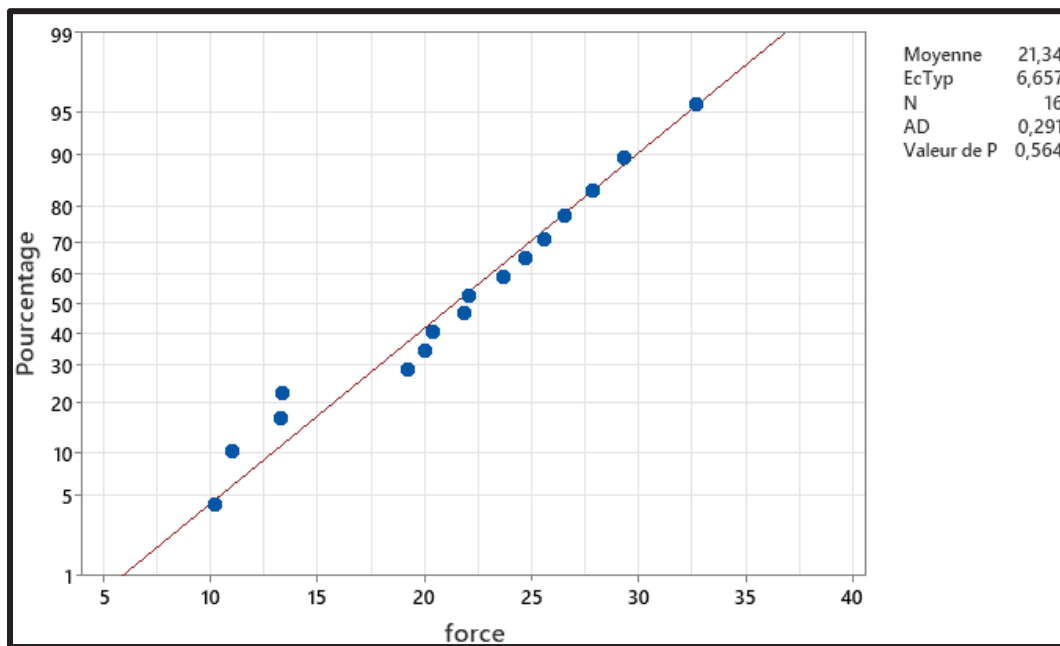


Figure AIII.9 La distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=2% et G=2%).

La valeur de P de vitesse d'avance vaut 0 la valeur est inférieure à la seuil 0,05. Donc la vitesse d'avance exerce une influence sur la force de coupe. Le tableau AIII.16 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIII.16 Analyse de variance de la plaque (C=2% et G=2%) après le test de normalité

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Nf	3	565,68	188,561	21,51	0,000
Vc	3	20,21	6,736	0,77	0,540
Erreur	9	78,89	8,766		
Total	15	664,78			

Ainsi, on a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Force} = 714N_f - 0.0255V_c - 4832N_f^2 + 0.000089V_c + 0.250V_cN_f \quad (\text{AIII.10})$$

Selon l'analyse de régression, tous les paramètres sauf N_f*V_c , V_c et V_c^2 ont une incidence significative sur la force de coupe.

Le tableau AIII.17 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIII.17 Analyse de variance de la plaque (C=2% et G=2%) après le test de régression

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	7856,70	1571,34	186,34	0,000
Nf	1	235,26	235,26	27,90	0,000
Vc	1	1,87	1,87	0,22	0,647
N_f*N_f	1	84,27	84,27	9,99	0,009
V_c*V_c	1	1,12	1,12	0,13	0,723
V_c*N_f	1	2,21	2,21	0,26	0,619
Erreur	11	92,76	8,43		
Total	16	7949,46			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP 2% cire et avec 2% de graphène, il est clair que tous les facteurs ont un impact significatif sur la force de coupe en excluant le paramètre N_f*V_c , V_c et V_c^2 .

ANNEXE IV

Évaluation et analyse de la température de foret après le perçage

Évaluation et analyse de température de foret après le perçage de la plaque GFRP (C=0% et G=0%)

Les tests statistiques, nous permettra de comprendre l'impact de vitesse de coupe et vitesse d'avance spécifiques sur la température générée pendant le processus de perçage de la plaque en GFRP sans cire et sans graphène. En examinant de près les variations de température et en identifiant les facteurs clés qui influencent ces changements thermiques, nous pourrions mieux optimiser les conditions d'usinage. Dans ce cas, on a appliqué le test de normalité d'Anderson-Darling. Après ce test on a trouvé que la valeur de p qui est égale à 0,392 est supérieure au seuil qui vaut 0,05. Par conclusion, donc les données analysées suivent une distribution normale. La figure AIV.1 présente la distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab.

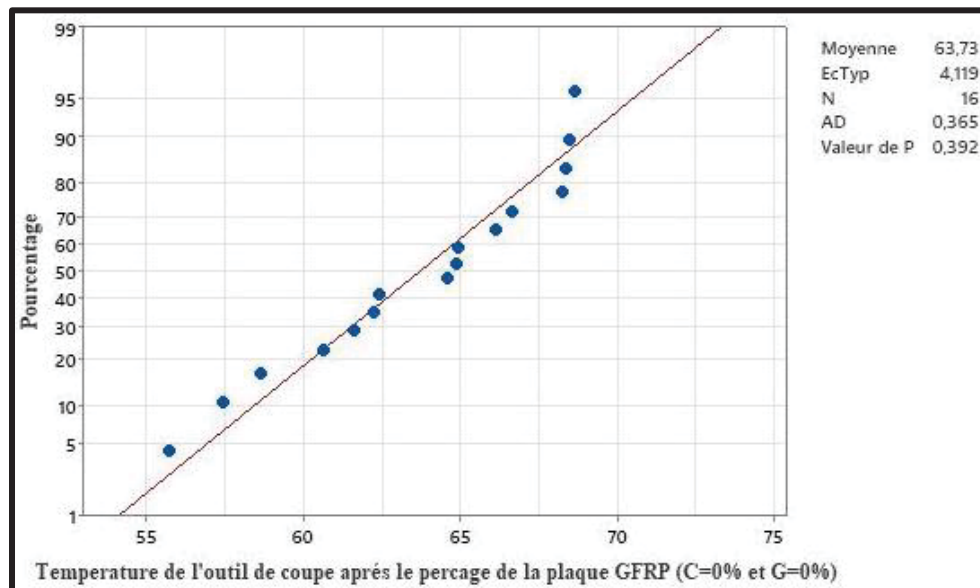


Figure AIV.1 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab pour la plaque GFRP (C=0% et G=0%).

Pour évaluer l'impact significatif des variables indépendantes (vitesse de coupe et vitesse d'avance) sur la variable dépendante continue, la température, et sous l'hypothèse que notre modèle suit une distribution normale, on a opté pour deux approches d'analyse paramétriques : le test ANOVA et le test t de Student. Ces méthodes permettent de déterminer si les différences observées entre les groupes sont statistiquement significatives, aidant ainsi à identifier l'effet des facteurs indépendants sur la température de manière approfondie. Le test Anova appliqué provoque l'analyse de la variance ce qui prouve que la vitesse de coupe est significative sur la température de l'outil de coupe lors de perçage de la plaque GFRP a 0% de cire et de 0% de graphène. Le tableau AIV.1 résume les résultats obtenus après l'Anova

Tableau AIV.1 Analyse de variance après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=0% et G=0%).

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Vc	3	144,848	48,283	4,30	0,039
Nf	3	8,419	2,806	0,25	0,860
Erreur	9	101,167	11,241		
Total	15	254,434			

La probabilité de vitesse de coupe observé est égale à 0,039 qui est inférieur au seuil prédéfini qui vaut 0,05, ainsi que la valeur statistique de test principale F est égale à 4,3, cela indique qu'il existe des différences significatives entre la vitesse de coupe et la température de l'outil de coupe. Cependant, au niveau de facteur de vitesse d'avance la valeur de p est supérieure à celle de seuil de signification statistique (valeur de P=0,860), ainsi que la valeur de F est très inférieur (=0,25) ce qui prouve qu'il n'y a probablement pas de signification entre la vitesse d'avance et la température de l'outil de coupe.

D'après l'Anova l'équation de la température de l'outil de coupe obtenue est :

$$\text{Température} = 63.731 + 1.18V_{c50} + 1.89V_{c100} + 2.11V_{c150} - 5.18V_{c200} + 0.48N_{f0.02} + 0.82N_{f0.04} - 1.07N_{f0.06} - 0.23N_{f0.08} \text{ (AIV.1)}$$

Cette équation ne peut être mise en œuvre dans des conditions réelles, car la température réelle de l'outil de coupe, avant toute utilisation, n'est pas de 63,731 degrés.

Pour établir un modèle statistique plus réaliste et comprendre l'importance des combinaisons de valeurs des paramètres de coupe, on a réalisé une analyse de régression.

Pour évaluer l'ajustement du modèle aux données on a le coefficient de détermination $R^2 = 98,71\% \approx R_{Ajusté}^2 = 98,12$ ce qui suggère que le modèle est à la condition idéale.

De plus, l'équation trouvée après cette analyse est :

$$\text{Température} = 1245N_f + 0.681V_c - 8809N_f^2 - 0.002260V_c^2 - 2.49N_fV_c \quad (\text{AIV.2})$$

Les valeurs de P liées aux facteurs appliqués lors de cette analyse, provoquent aussi que V_c^2 provoque une signification sur la température de l'outil de coupe selon le modèle statistique.

Celle-ci est fournie par les résultats dans le tableau suivant :

Tableau AIV.2 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque GFRP (C=0% et G=0%).

Terme	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Nf	1245	408	3,05	0,011	104,11
Vc	0,681	0,163	4,17	0,002	104,11
Nf*Nf	-8809	4613	-1,91	0,083	62,77
Vc*Vc	-0,002260	0,000738	-3,06	0,011	62,77
Nf*Vc	-2,49	1,48	-1,68	0,120	25,53

En résumé, à la suite de l'examen des résultats concernant la plaque GFRP sans cire et sans graphène, il est évident que la vitesse de coupe a un impact significatif sur la température de l'outil de coupe. Dans les sections suivantes, on va poursuivre les mêmes tests sur les différentes plaques.

Évaluation et analyse de température de foret après le perçage de la plaque GFRP (C=0% et G=0,25%)

Après le test de normalité sur les températures de l'outil de coupe qu'on a, on a trouvé que la valeur de p qui est égale à 0,829 est supérieure au seuil qui vaut 0,05. Donc, on peut conclure

que les données analysées suivent une distribution normale, donc on peut appliquer le test Anova. La figure AIV.2 présente la distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab.

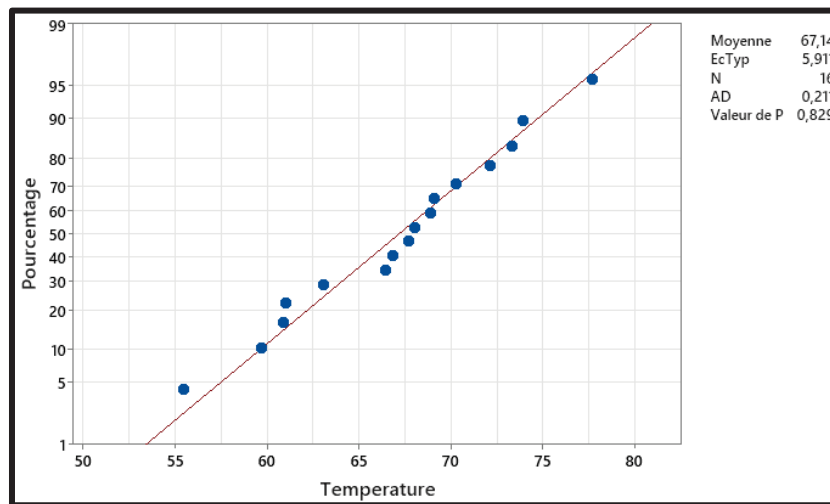


Figure AIV.2 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab

La valeur de P de vitesse de coupe vaut 0,017 donc la vitesse de coupe exerce une influence très importante sur la température de l'outil de coupe. Le tableau AIV.3 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIV.3 Analyse de variance après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=0% et G=0%).

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Vc	3	299,73	99,91	5,85	0,017
Nf	3	70,73	23,58	1,38	0,310
Erreur	9	153,68	17,08		
Total	15	524,14			

Ainsi que ces résultats donnent un modèle plus significatif et meilleur avec l'équation mathématique :

$$\text{Température} = 1580N_f + 0.614V_c - 11936N_f^2 - 0.002235V_c^2 - 1.86N_fV_c \quad (\text{AIV.3})$$

Les paramètres significatifs sur les résultats de température de l'outil de coupe sont

Nf^2 et Vc^2 . Le tableau AIV.4 résume toutes les valeurs de p trouvé pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIV.4 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque GFRP (C=0% et G=0%).

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	71746,7	14349,3	176,95	0,000
Nf	1	1150,8	1150,8	14,19	0,003
Vc	1	1085,4	1085,4	13,38	0,004
Nf*Nf	1	514,2	514,2	6,34	0,029
Vc*Vc	1	704,1	704,1	8,68	0,013
Nf*Vc	1	121,6	121,6	1,50	0,246
Erreur	11	892,0	81,1		
Total	16	72638,8			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP sans cire et avec 0,25% de graphène, il est clair que tous les facteurs, à l'exception de Nf*Vc, ont un impact significatif sur la température de l'outil de coupe.

Évaluation et analyse de température de foret après le perçage de la plaque GFRP (C=0% et G=2%)

Après le test de normalité sur les températures de l'outil de coupe qu'on a. on a trouvé que la valeur de p qui est égale à 0,303 est supérieure au seuil qui vaut 0,05. Donc, on peut conclure que les données analysées suivent une distribution normale, donc on peut appliquer le test Anova. La figure AIV.3 présente la distribution des données trouvé après un test de normalité sur MiniTab.

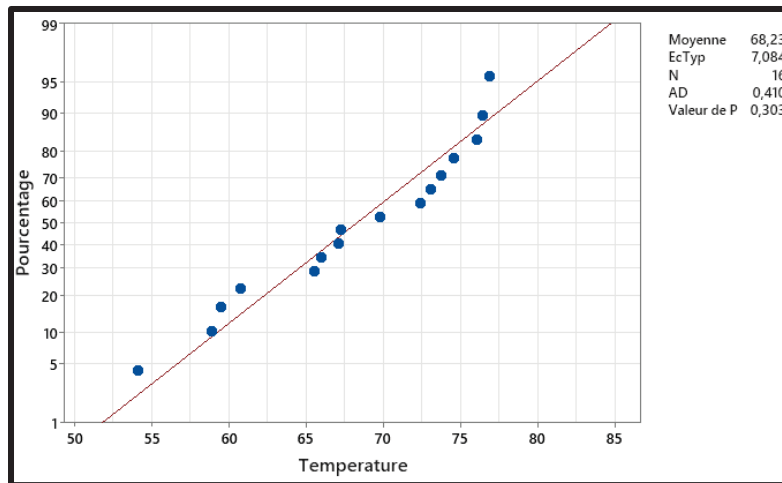


Figure AIV.3 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab (C=0% et G=2%)

La valeur de P de vitesse de coupe vaut 0, donc la vitesse de coupe exerce une influence très importante sur la température de l'outil de coupe. Le tableau AIV.5 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIV.5 Analyse de variance après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=0% et G=2%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Vc	3	610,83	203,61	18,97	0,000
Nf	3	45,35	15,12	1,41	0,303
Erreur	9	96,60	10,73		
Total	15	752,78			

Ainsi que ces résultats donnent un modèle plus significatif et meilleur avec l'équation mathématique :

$$\text{Température} = 1660N_f + 0.644V_c^2 - 11157N_f^2 - 0.002215V_c - 3.73N_f V_c \quad (\text{AIV.4})$$

D'après l'analyse de régression toutes les paramètres sont significatifs sur la température de l'outil de coupe

Le tableau AIV.6 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIV.6 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque GFRP (C=0% et G=2%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	74722,7	14944,5	322,97	0,000
Nf	1	1270,4	1270,4	27,46	0,000
Vc	1	1268,9	1268,9	27,42	0,000
Nf*Nf	1	449,3	449,3	9,71	0,010
Vc*Vc	1	691,8	691,8	14,95	0,003
Nf*Vc	1	489,4	489,4	10,58	0,008
Erreur	11	509,0	46,3		
Total	16	75231,7			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP sans cire et avec 2% de graphène, il est clair que tous les facteurs ont un impact significatif sur la température de l'outil de coupe.

Évaluation et analyse de température de foret après le perçage de la plaque GFRP (C=1% et G=0%)

Après le test de normalité sur les températures de l'outil de coupe qu'on a. on a trouvé que la valeur de p qui est égale à 0,340 est supérieure au seuil qui vaut 0,05. Donc, on peut conclure que les données analysées suivent une distribution normale, donc on peut appliquer le test Anova. La figure AIV.4 présente la distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab.

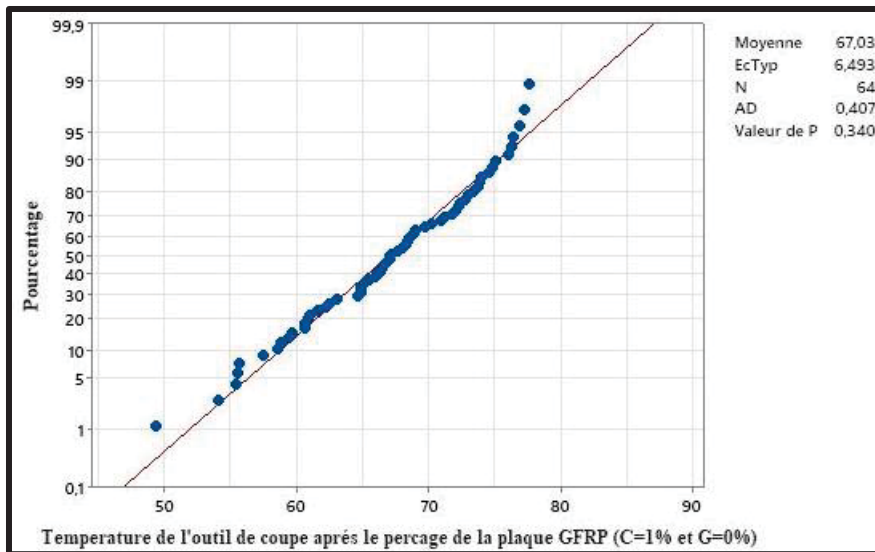


Figure AIV.4 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab (C=1% et G=0%) .

La valeur de P de vitesse de coupe vaut 0 donc la vitesse de coupe exerce une influence très importante sur la température de l'outil de coupe. Le tableau AIV.7 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIV.7 Analyse de variance après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=1% et G=0%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Vc	3	1463,7	487,89	26,43	0,000
Nf	3	140,5	46,82	2,54	0,066
Erreur	57	1052,1	18,46		
Inadéquation de l'ajustement	9	178,1	19,78	1,09	0,390
Erreur pure	48	874,0	18,21		
Total	63	2656,2			

Ainsi que ces résultats donnent un modèle plus significatif et meilleur avec l'équation mathématique :

$$\text{Température} = 1548N_f + 0.6529V_c - 11454N_f^2 - 0.002332V_c^2 - 2.340N_f V_c \quad (\text{AIV.5})$$

Selon l'analyse de régression, tous les paramètres ont une incidence significative sur la température de l'outil de coupe, à l'exception de la vitesse d'avance.

Le tableau AIV.8 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIV.8 Analyse de variance après le test de regression sur MiniTab de la plaque GFRP (C=1% et G=0%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	64396,4	12879,3	167,71	0,000
Nf	1	714,3	714,3	9,30	0,011
Vc	1	1336,1	1336,1	17,40	0,002
Nf*Nf	1	280,0	280,0	3,65	0,083
Vc*Vc	1	720,2	720,2	9,38	0,011
Nf*Vc	1	218,0	218,0	2,84	0,120
Erreur	11	844,7	76,8		
Total	16	65241,2			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP 0% cire et avec 2% de graphène, il est clair que tous les facteurs ont un impact significatif sur la température de l'outil de coupe en excluant la vitesse d'avance et Nf^2 .

Évaluation et analyse de température de foret après le perçage de la plaque GFRP (C=1% et G=0,25%)

À la suite du test de normalité effectué sur les températures de l'outil de coupe, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,459, qui dépasse le seuil de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données analysées suivent une distribution normale, ce qui nous permet d'appliquer le test ANOVA. La figure AIV.5 illustre la distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab.

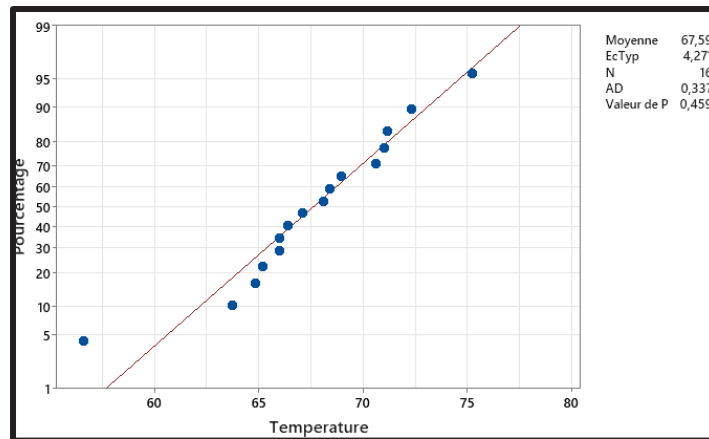


Figure AIV.5 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab
(C=1% et G=0.25%)

La valeur de P de vitesse de coupe vaut 0,057 et pour la vitesse d'avance vaut 0,839. Les deux valeurs sont supérieures au seuil 0,05. Donc les paramètres de coupe n'exercent pas une influence sur la température de l'outil de coupe. Le tableau AIV.9 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIV.9 Analyse de variance après le test de normalité sur MiniTab de la plaque
GFRP (C=1% et G=0,25%)

Source	DL	SomCar	ajust	CM	ajust	Valeur F	Valeur de p
Vc	3	143,98	47,992	3,64	0,057		
Nf	3	11,03	3,677	0,28	0,839		
Erreur	9	118,63	13,181				
Total	15	273,64					

Ainsi, on a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Température} = 1421N_f + 0.680V_c - 10469N_f^2 - 0.002273V_c^2 - 2.45N_fV_c \quad (\text{A4.6})$$

Selon l'analyse de régression, tous les paramètres sauf N_f^2 ont une incidence significative sur la température de l'outil de coupe.

Le tableau AIV.10 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIV.10 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque GFRP (C=1% et G=0,25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	72302,6	14460,5	150,17	0,000
Nf	1	931,1	931,1	9,67	0,010
Vc	1	1333,9	1333,9	13,85	0,003
Nf*Nf	1	395,6	395,6	4,11	0,068
Vc*Vc	1	728,7	728,7	7,57	0,019
Nf*Vc	1	211,4	211,4	2,20	0,167
Erreur	11	1059,3	96,3		
Total	16	73361,9			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP 1% cire et avec 0,25% de graphène, il est clair que tous les facteurs ont un impact significatif sur la température de l'outil de coupe en excluant la vitesse d'avance et Nf^2 .

Évaluation et analyse de température de foret après le perçage de la plaque GFRP (C=1% et G=2%)

À la suite du test de normalité effectué sur les températures de l'outil de coupe, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,762, qui dépasse le seuil de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données analysées suivent une distribution normale, ce qui nous permet d'appliquer le test ANOVA. La figure AIV.6 illustre la distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab.

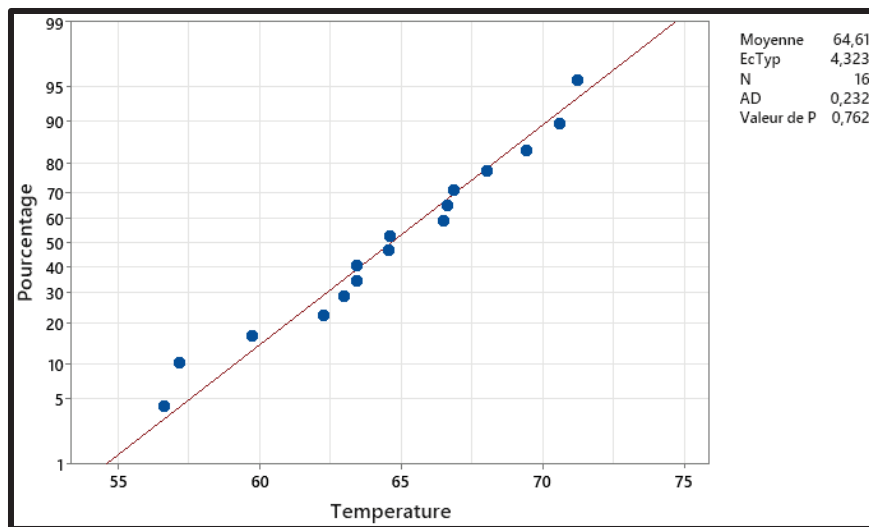


Figure AIV.6 La distribution des données trouvé après un test de normalité sur MiniTab
(C=1% et G=2%)

La valeur de P de vitesse de coupe vaut 0,065 et pour la vitesse d'avance vaut 0,437. Les deux valeurs sont supérieures à la seuil 0,05. Donc les paramètres de coupe n'exercent pas une influence sur la température de l'outil de coupe. Le tableau AIV.11 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIV.11 Analyse de variance après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=1% et G=0,25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Vc	3	129,78	43,26	3,45	0,065
Nf	3	37,59	12,53	1,00	0,437
Erreur	9	112,91	12,55		
Total	15	280,28			

Ainsi, on a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Température} = 1566N_f + 0.591V_c - 12499N_f^2 - 0.001965V_c^2 - 2.24N_fV_c \quad (\text{AIV.7})$$

Selon l'analyse de régression, tous les paramètres ont une incidence significative sur la température de l'outil de coupe.

Le tableau AIV.12 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIV.12 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque GFRP (C=1% et G=0,25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	66177,1	13235,4	162,62	0,000
Nf	1	1130,8	1130,8	13,89	0,003
Vc	1	1006,3	1006,3	12,36	0,005
Nf*Nf	1	563,8	563,8	6,93	0,023
Vc*Vc	1	544,3	544,3	6,69	0,025
Nf*Vc	1	176,3	176,3	2,17	0,169
Erreur	11	895,3	81,4		
Total	16	67072,4			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP 1% cire et avec 2% de graphène, il est clair que tous les facteurs ont un impact significatif sur la température de l'outil de coupe.

Évaluation et analyse de température de foret après le perçage de la plaque GFRP (C=2% et G=0%)

À la suite du test de normalité effectué sur les températures de l'outil de coupe, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,214, qui dépasse le seuil de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données analysées suivent une distribution normale, ce qui nous permet d'appliquer le test ANOVA. La figure AIV.7 illustre la distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab.

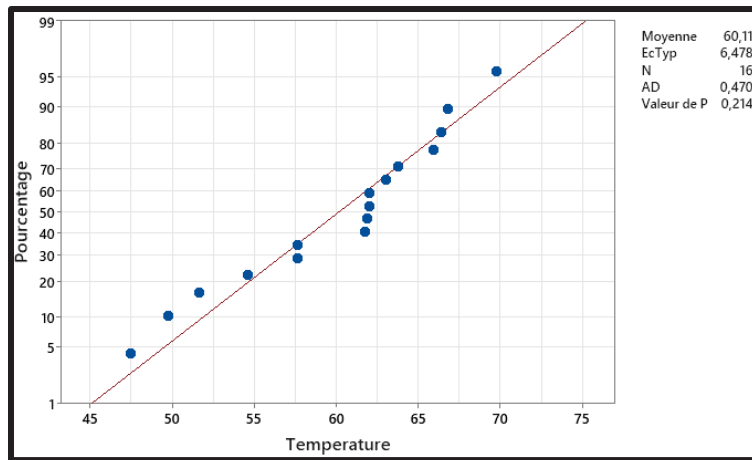


Figure AIV.7 La distribution des données trouvé après un test de normalité sur MiniTab
(C=2% et G=0%)

La valeur de P de vitesse de coupe vaut $0,002 \leq 0,05$. Donc la vitesse de coupe exerce une influence sur la température de l'outil de coupe. Le tableau AIV.13 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIV.13 Analyse de variance après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=1% et G=0,25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Vc	3	499,736	166,579	11,72	0,002
Nf	3	1,826	0,609	0,04	0,987
Erreur	9	127,893	14,210		
Total	15	629,455			

Ainsi, on a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Température} = 1278N_f + 0.659V_c - 9172N_f^2 - 0.002428V_c^2 - 2.21N_f V_c \quad (\text{AIV.8})$$

Selon l'analyse de régression, tous les paramètres ont une incidence significative sur la température de l'outil de coupe sauf le paramètre N_f^2 .

Le tableau AIV.14 résume toutes les valeurs de p trouvé pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIV.14 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque GFRP (C=1% et G=0,25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	57627,2	11525,4	154,14	0,000
Nf	1	752,6	752,6	10,06	0,009
Vc	1	1252,0	1252,0	16,74	0,002
Nf*Nf	1	303,7	303,7	4,06	0,069
Vc*Vc	1	830,8	830,8	11,11	0,007
Nf*Vc	1	172,5	172,5	2,31	0,157
Erreur	11	822,5	74,8		
Total	16	58449,7			

En conclusion, après avoir étudié les résultats concernant la plaque GFRP avec 2% de cire et 0% de graphène, il est évident que tous les facteurs ont un impact significatif sur la température de l'outil de coupe, à l'exception de Nf^2 .

Évaluation et analyse de température de foret après le perçage de la plaque GFRP (C=2% et G=0,25%)

À la suite du test de normalité effectué sur les températures de l'outil de coupe, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,048 qui est inférieure le seuil de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données analysées ne suivent pas une distribution normale, ce qui nous ne permet pas d'appliquer le test ANOVA. La figure AIV.8 illustre la distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab.

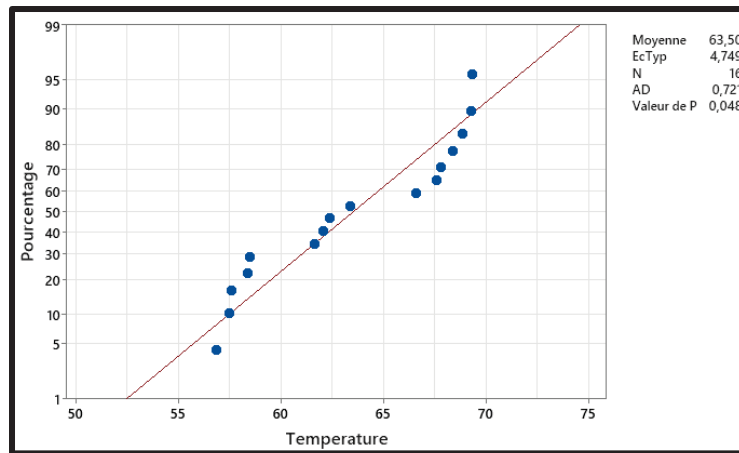


Figure AIV.8 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab
(C=2% et G=0,25%)

On a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Température} = 1413N_f + 0.558V_c - 9025N_f^2 - 0.001803V_c^2 - 2.69N_f V_f \quad (\text{AIV.9})$$

Ainsi que le tableau AIV.15 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIV.15 Analyse de variance après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=2% et G=0,25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	63756,6	12751,3	127,05	0,000
Nf	1	919,9	919,9	9,17	0,012
Vc	1	896,5	896,5	8,93	0,012
Nf*Nf	1	294,0	294,0	2,93	0,115
Vc*Vc	1	458,4	458,4	4,57	0,056
Nf*Vc	1	255,6	255,6	2,55	0,139
Erreur	11	1104,0	100,4		
Total	16	64860,6			

En conclusion, après avoir étudié les résultats obtenus après le test de régression concernant la plaque GFRP avec 2% de cire et 0,25% de graphène, il est évident que tous les facteurs ont un impact significatif sur la température de l'outil de coupe, à l'exception de N_f^2 .

Évaluation et analyse de température de foret après le perçage de la plaque GFRP (C=2% et G=2%)

À la suite du test de normalité effectué sur les températures de l'outil de coupe, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,505, qui dépasse le seuil de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données analysées suivent une distribution normale, ce qui nous permet d'appliquer le test ANOVA. La figure AIV.9 illustre la distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab.

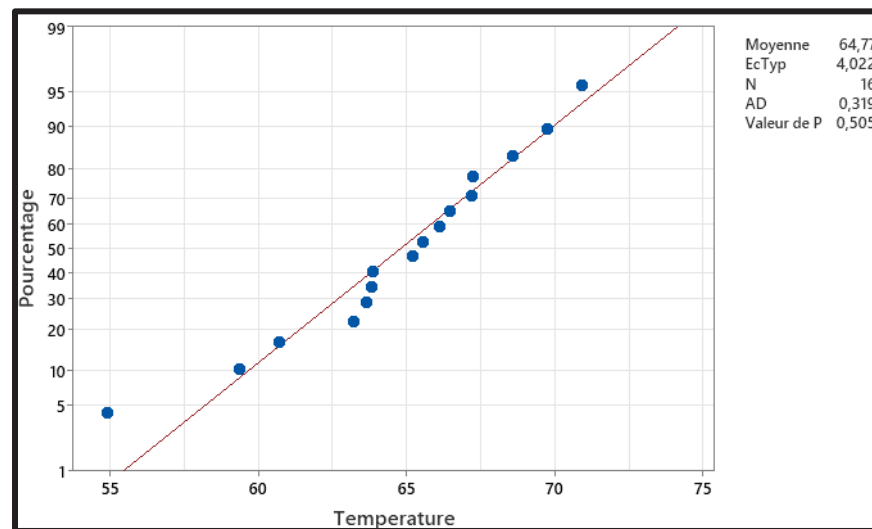


Figure AIV.9 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab (C=2% et G=2%)

La valeur de P de vitesse de coupe vaut 0,007 la valeur est supérieure à la seuil 0,05. Donc la vitesse de coupe exerce une influence sur la température de l'outil de coupe. Le tableau AIV.16 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AIV.16 Analyse de variance après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=2% et G=2%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Vc	3	126,96	42,320	7,98	0,007
Nf	3	67,90	22,634	4,27	0,039
Erreur	9	47,74	5,305		
Total	15	242,61			

Ainsi, on a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Température} = 1537N_f + 0.565V_c - 11748N_f^2 - 0.001928V_c^2 - 1.91N_fV_c \quad (\text{AIV.10})$$

Selon l'analyse de régression, tous les paramètres sauf $N_f \cdot V_c$ ont une incidence significative sur la température de l'outil de coupe.

Le tableau AIV.17 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AIV.17 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque GFRP (C=2% et G=2%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	66757,6	13351,5	241,11	0,000
Nf	1	1089,5	1089,5	19,67	0,001
Vc	1	919,8	919,8	16,61	0,002
Nf*Nf	1	498,1	498,1	8,99	0,012
Vc*Vc	1	524,0	524,0	9,46	0,011
Nf*Vc	1	129,0	129,0	2,33	0,155
Erreur	11	609,1	55,4		
Total	16	67366,8			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP 2% cire et avec 2% de graphène, il est clair que tous les facteurs ont un impact significatif sur la température de l'outil de coupe en excluant le paramètre $N_f \cdot V_c$.

Évaluation de la différence entre les échantillons

Dans cette partie, on va examiner l'application du test t de Student pour comparer les performances de deux échantillons présentant les plus grands écarts dans le coefficient de détermination (R^2) de l'ANOVA. Le R^2 de la plaque GFRP à 0% de cire et à 2% de graphène vaut 87,17% ainsi que le R^2 de la plaque GFRP à 2% de cire et de 2% de graphène est égale à 80,32%.

L'objectif de cette analyse est de déterminer si les variations observées dans les paramètres de coupe entraînent des différences significatives dans la température de l'outil de coupe entre les deux types de plaques. Cette distinction est cruciale pour identifier les conditions de coupe optimales et orienter les décisions de fabrication vers des pratiques plus efficaces et économiques.

Tout d'abord, on a remarqué que la valeur p obtenue à partir du test t de Student sur les deux plaques choisis est supérieure à 0,05, cela indique qu'il n'y a pas suffisamment de preuves pour rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle il n'y a pas de différence significative entre les moyennes des deux échantillons. Dans ce cas, il est important de procéder à une analyse plus approfondie pour interpréter les résultats de manière adéquate.

En considérant l'écart-type de température ($C=0\%$ et $G=2\%$) vaut 7,08 et pour la température ($C=2\%$ et $G=2\%$) vaut 4.02 ainsi que les résultats du test t de Student, on peut tirer les conclusions suivantes :

- L'écart-type élevé de température ($C=0\%$ et $G=2\%$) indique une variabilité importante des données autour de la moyenne. Cela suggère que les températures mesurées peuvent être dispersées sur une large plage, ce qui peut avoir des implications sur la stabilité du processus d'usinage.
- Le diagramme des valeurs individuelles ci-dessous illustre une corrélation positive entre la température et les degrés de liberté. En général, la température COG2 présente des valeurs plus élevées que la température C2G2, avec une dispersion plus prononcée. Par ailleurs, quelques valeurs aberrantes sont observées dans les deux ensembles de données, pouvant résulter d'erreurs de mesure ou de conditions expérimentales atypiques. La variation accrue de la température COG2 pourrait être attribuée à sa structure moléculaire plus complexe.

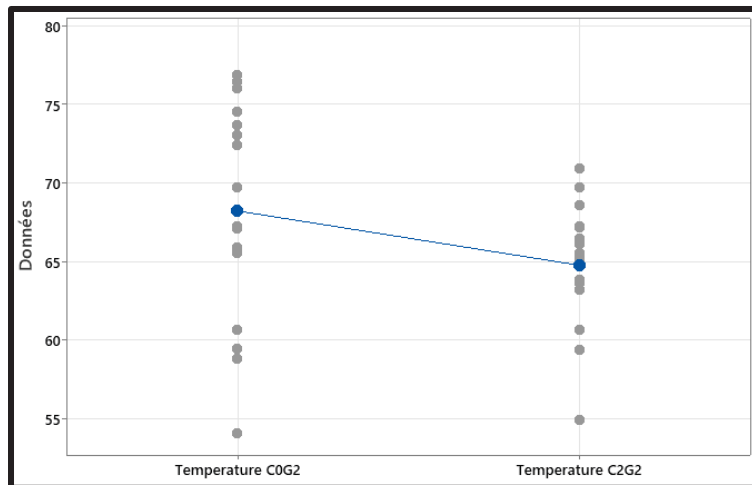


Figure AIV.10 Diagramme des valeurs individuelles de température C0G2, température C2G2

- Dans le diagramme en boîte à moustaches, la médiane divise les données en deux groupes de taille égale. L'observation que la médiane de la température COG2 dépasse celle de la température C2G2 indique que la moitié des valeurs de COG2 sont supérieures à la moitié des valeurs de C2G2. L'écart interquartile (IQR), qui mesure la dispersion des données, est également plus grand pour la température COG2 que pour la température C2G2, indiquant une dispersion plus importante des valeurs de COG2. Les valeurs aberrantes, très éloignées du reste des données, peuvent résulter d'erreurs de mesure ou de conditions expérimentales inhabituelles. La figure AIV.11 provoque le diagramme en boîte à moustaches

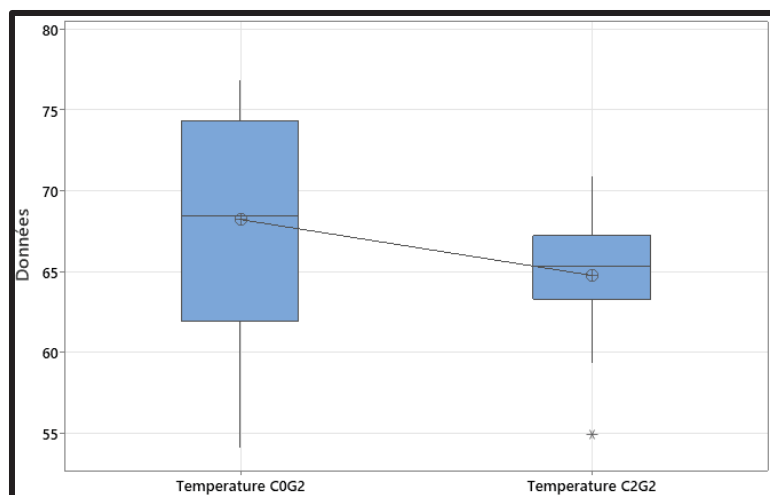


Figure AIV.11 Boîte a moustaches de température C0G2, température C2G2

ANNEXE V

Évaluation et analyse de la rugosité

Évaluation et analyse de la rugosité de la plaque GFRP (C=0% et G=0%)

Les tests statistiques, nous permettra de comprendre l'impact de vitesse de coupe et vitesse d'avance spécifiques sur la rugosité obtenue apres le processus de perçage de la plaque en GFRP sans cire et sans graphène. En examinant de près les variations de rugosité, nous pourrons mieux optimiser les conditions d'usinage. Dans ce cas, on a appliqué le test de normalité d'Anderson-Darling. Après ce test on a trouvé que la valeur de p qui est égale à 0,093 est supérieure au seuil qui vaut 0,05. Par conclusion, donc les données analysées suivent une distribution normale. La figure AV.1 présente la distribution des données trouvé après un test de normalité sur MiniTab.

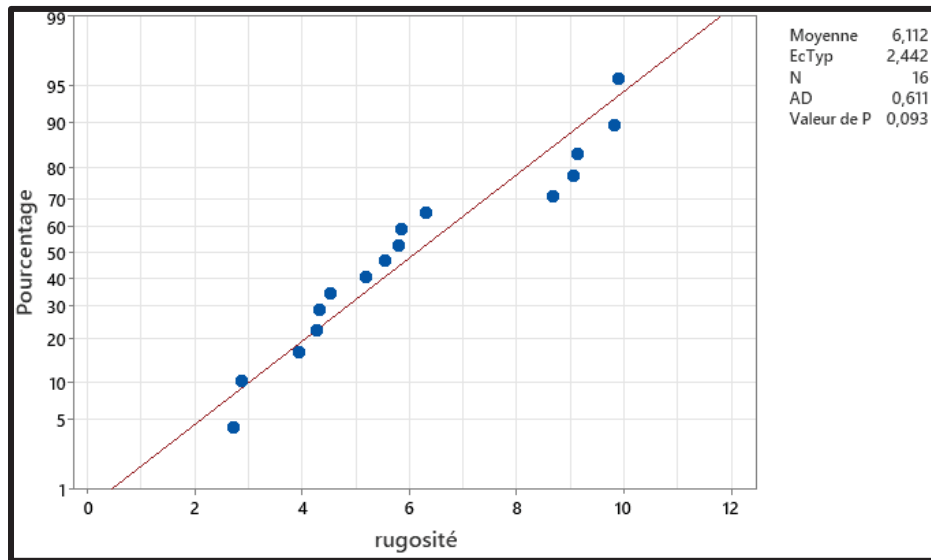


Figure AV.1 La distribution des données trouvé après un test de normalité sur MiniTab
(C=0% et G=0%)

Pour évaluer l'impact significatif des variables indépendantes (vitesse de coupe et vitesse d'avance) sur la variable dépendante continue, la force, et sous l'hypothèse que notre modèle suit une distribution normale, on a opté pour deux approches d'analyse paramétriques : le test

ANOVA et le test t de Student. Ces méthodes permettent de déterminer si les différences observées entre les groupes sont statistiquement significatives, aidant ainsi à identifier l'effet des facteurs indépendants sur la rugosité de manière approfondie. Le test Anova appliqué provoque l'analyse de la variance ce qui prouve que la vitesse de coupe est significative sur la température de l'outil de coupe lors de perçage de la plaque GFRP a 0% de cire et de 0% de graphène. Le tableau AV.1 résume les résultats obtenus après l'Anova

Tableau AV.1 Analyse de variance après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=0% et G=0%)

Source	DL	SomCar	ajust	CM	ajust	Valeur F	Valeur de p
Nf	3	20,75	6,917	1,60	0,257		
Vc	3	29,78	9,926	2,30	0,146		
Erreur	9	38,90	4,322				
Total	15	89,43					

La probabilité de vitesse d'avance observé est égale à 0,257 et la vitesse de coupe vaut 0,146 qui sont supérieurs au seuil prédéfini qui vaut 0,05, cela indique qu'il n'existe pas des significations entre la vitesse d'avance et la vitesse de coupe et la rugosité.

D'après l'Anova l'équation de la force de coupe obtenue est :

$$\text{Rugosité} = 6.112 + 1.047N_{f0.02} + 0.761N_{f0.04} + 0.065N_{f0.06} - 1.873N_{f0.08} - 0.459V_{c50} - 1.868V_{c100} + 0.444V_{c150} + 1.883V_{c200} \quad (\text{AV.1})$$

Cette équation ne peut être mise en œuvre dans des conditions réelles, car la rugosité réelle, n'est pas de 6,1 μm .

Pour établir un modèle statistique plus réaliste et comprendre l'importance des combinaisons de valeurs des paramètres de coupe, on a réalisé une analyse de régression.

Pour évaluer l'ajustement du modèle aux donnée on a le coefficient de détermination $R^2 = 93,84\% \approx R_{Ajusté}^2 = 91,05\%$ ce qui suggère que le modèle est à la condition idéale.

De plus, l'équation trouvé après cette analyse est :

$$\text{Rugosité} = 215.9N_f + 0.0115V_c - 1728N_f^2 + 0.000174V_c^2 - 0.679V_cN_f \quad (\text{AV.2})$$

Les valeurs de P liée au facteurs appliqués lors de cette analyse, provoque aussi que Nf provoque une signification sur la rugosité selon le modèle statistique.

Celle-ci est fourni par les résultats dans le tableau suivant :

Tableau AV.2 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque GFRP (C=0% et G=0%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	644,823	128,965	33,54	0,000
Nf	1	21,497	21,497	5,59	0,038
Vc	1	0,378	0,378	0,10	0,760
Nf*Nf	1	10,773	10,773	2,80	0,122
Vc*Vc	1	4,250	4,250	1,11	0,316
Vc*Nf	1	16,253	16,253	4,23	0,064
Erreur	11	42,296	3,845		
Total	16	687,119			

En résumé, à la suite de l'examen des résultats concernant la plaque GFRP sans cire et sans graphène, il est évident que sauf la vitesse d'avance a un impact significatif sur la rugosité . Dans les sections suivantes, on va poursuivre les mêmes tests sur les différentes plaques.

Évaluation et analyse de rugosité de la plaque GFRP (C=0% et G=0.25%)

Après le test de normalité sur les forces de coupe qu'on a trouvé que la valeur de p qui est égale à 0,007 est inférieur au seuil qui vaut 0,05. Donc, on peut conclure que les données analysées ne suivent pas une distribution normale, donc on ne peut pas appliquer le test Anova. La figure AV.2 présente la distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab.

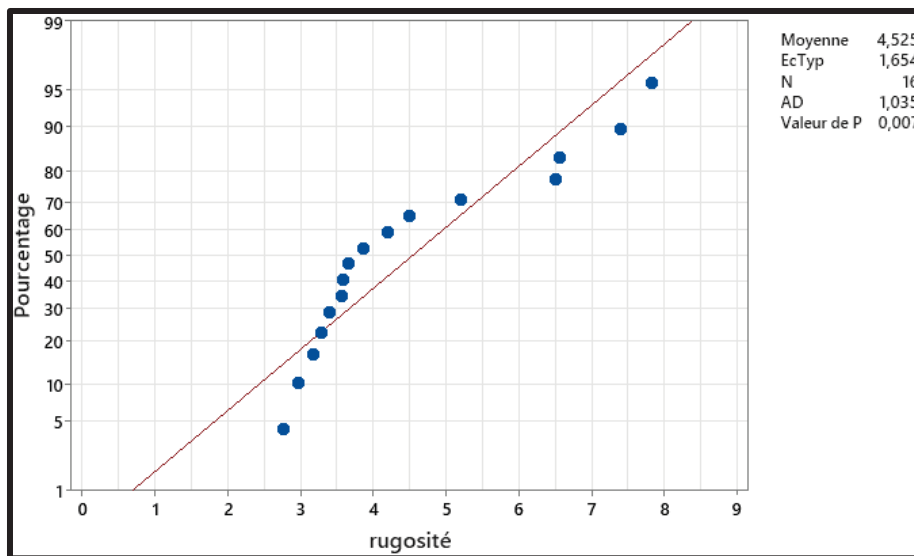


Figure AV.2 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab
(C=0% et G=0,25%)

On a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Rugosité} = 103.2N_f + 0.0088V_c - 430N_f^2 + 0.000171V_c^2 - 0.588V_cN_f \quad (\text{AV.3})$$

Ainsi que le tableau AV.3 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AV.3 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque
GFRP (C=0% et G=0.25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	361,771	72,3542	115,19	0,000
Nf	1	4,906	4,9063	7,81	0,017
Vc	1	0,224	0,2237	0,36	0,563
Nf*Nf	1	0,667	0,6667	1,06	0,325
Vc*Vc	1	4,117	4,1167	6,55	0,027
Vc*Nf	1	12,187	12,1871	19,40	0,001
Erreur	11	6,909	0,6281		
Total	16	368,680			

En conclusion, après avoir étudié les résultats obtenus après le test de régression concernant la plaque GFRP avec 0% de cire et 0,25% de graphène, il est évident que tous les facteurs ont un impact significatif sur la rugosité, à l'exception de Nf^2 et Vc .

Évaluation et analyse de rugosité de la plaque GFRP (C=0% et G=2%)

Après le test de normalité sur les rugosités on a trouvé que la valeur de p qui est égale à 0,103 est supérieure au seuil qui vaut 0,05. Donc, on peut conclure que les données analysées suivent une distribution normale, donc on peut appliquer le test Anova. La figure AV.3 présente la distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab.

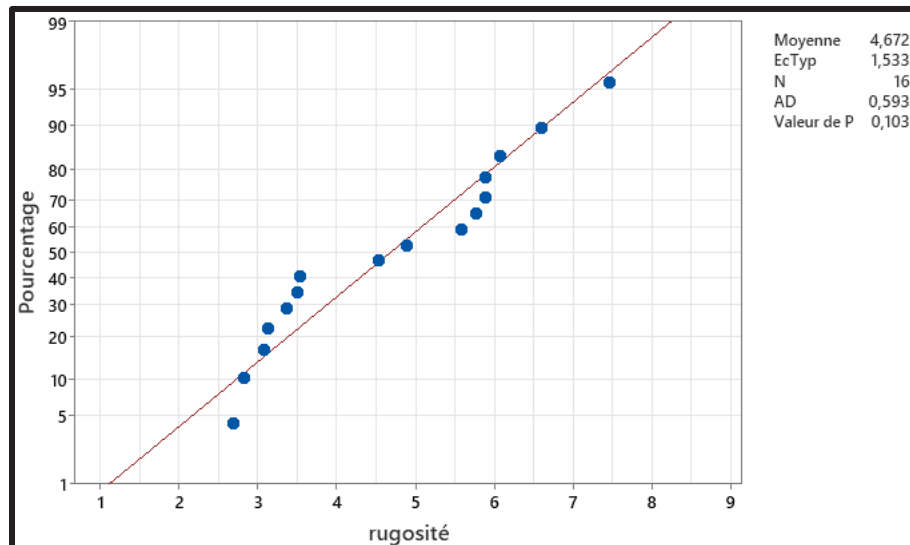


Figure AV.3 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab (C=0% et G=2%)

La valeur de P de vitesse de coupe vaut 0,012 donc la vitesse de coupe exerce une influence très importante sur la rugosité. Le tableau AV.4 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AV.4 Analyse de variance après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=0% et G=2%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Nf	3	0,8938	0,2979	0,25	0,861
Vc	3	23,5304	7,8435	6,52	0,012
Erreur	9	10,8276	1,2031		
Total	15	35,2519			

Ainsi que ces résultats donnent un modèle plus significatif et meilleur avec l'équation mathématique :

$$\text{Rugosité} = 45.8N_f + 0.0392V_c - 301N_f^2 - 0.000036V_c^2 - 0.159V_cN_f \quad (\text{AV.4})$$

D'après l'analyse de régression toutes les paramètres de coupe ne sont pas significatifs sur la rugosité.

Le tableau AV.5 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AV.5 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque GFRP (C=0% et G=2%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	369,007	73,8014	52,42	0,000
Nf	1	0,966	0,9665	0,69	0,425
Vc	1	4,436	4,4362	3,15	0,104
Nf*Nf	1	0,327	0,3273	0,23	0,639
Vc*Vc	1	0,178	0,1780	0,13	0,729
Vc*Nf	1	0,894	0,8940	0,64	0,442
Erreur	11	15,486	1,4078		
Total	16	384,493			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP sans cire et avec 2% de graphène, il est clair que les facteurs sont supérieurs au 0,05 donc ils n'ont pas un impact significatif sur la force de coupe.

Évaluation et analyse de rugosité de la plaque GFRP (C=1% et G=0%)

Après le test de normalité sur les forces de coupe qu'on a trouvé que la valeur de p qui est égale à 0,023 est inférieur au seuil qui vaut 0,05. Donc, on peut conclure que les données analysées ne suivent pas une distribution normale, donc on ne peut pas appliquer le test Anova. La figure AV.4 présente la distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab.

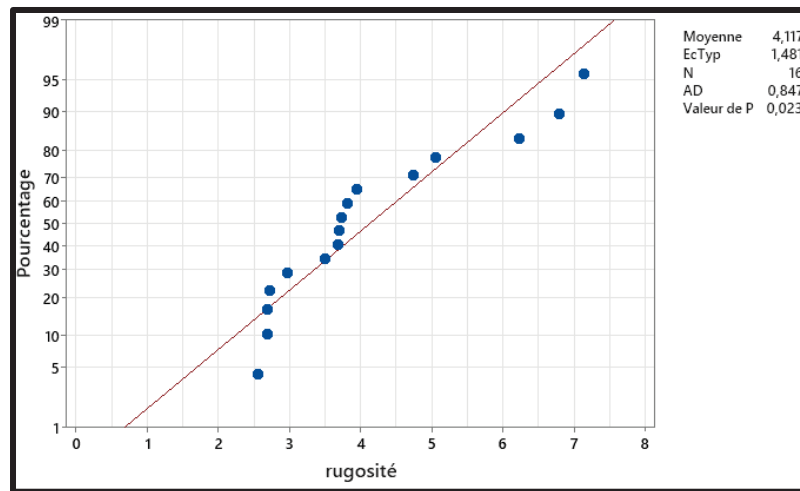


Figure AV.4 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab (C=1% et G=0%)

On a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Rugosité} = 91.8N_f + 0.0177V_c - 683N_f^2 + 0.000053V_c^2 - 0.261V_cN_f \quad (\text{AV.5})$$

Ainsi que le tableau AV.6 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AV.6 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque GFRP (C=1% et G=0%)

Source	DL	SomCar	ajust	CM	ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	288,158	57,6317	39,80	0,000		
Nf	1	3,884	3,8844	2,68	0,130		
Vc	1	0,898	0,8978	0,62	0,448		
Nf*Nf	1	1,684	1,6838	1,16	0,304		
Vc*Vc	1	0,389	0,3887	0,27	0,615		
Vc*Nf	1	2,408	2,4085	1,66	0,224		
Erreur	11	15,927	1,4479				
Total	16	304,085					

En conclusion, après avoir étudié les résultats obtenus après le test de régression concernant la plaque GFRP avec 1% de cire et 0% de graphène, il est évident que tous les facteurs n'ont pas un impact significatif sur la rugosité.

Évaluation et analyse de rugosité de la plaque GFRP (C=1% et G=0,25%)

À la suite du test de normalité effectué sur rugosité, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,676, qui dépasse le seuil de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données analysées suivent une distribution normale, ce qui nous permet d'appliquer le test ANOVA. La figure AV.5 illustre la distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab.

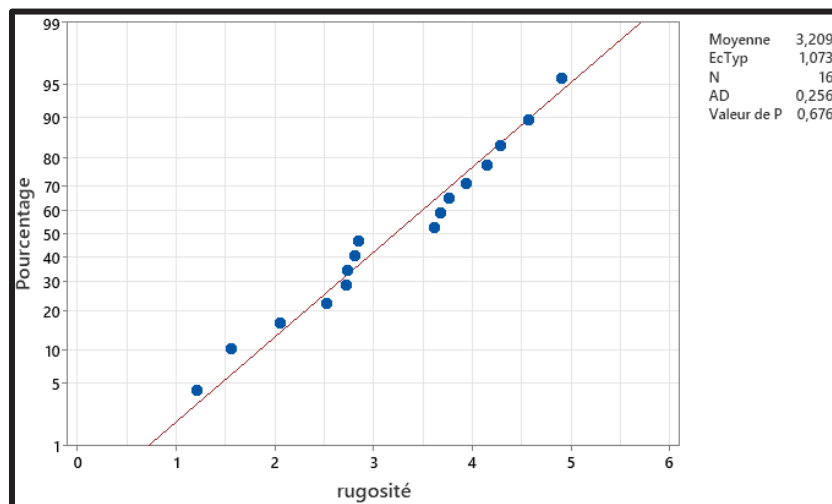


Figure AV.5 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab (C=1% et G=0,25%)

La valeur de P de vitesse de coupe vaut 0,041 et pour la vitesse d'avance vaut 0,203. La valeur de vitesse d'avance est supérieure à la seuil 0,05. Donc la vitesse d'avance n'exerce pas une influence sur la force de coupe. Le tableau AV.7 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AV.7 Analyse de variance après le test de normalité sur MiniTab de la plaque GFRP
(C=1% et G=0,25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Nf	3	3,577	1,1923	1,88	0,203
Vc	3	7,984	2,6614	4,21	0,041
Erreur	9	5,693	0,6326		
Total	15	17,254			

Ainsi, on a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Rugosité} = 63.5N_f + 0.0075V_c - 307N_f^2 + 0.000043V_c^2 - 0.124V_cN_f \quad (\text{AV.6})$$

Selon l'analyse de régression, tous les paramètres n'ont pas une incidence significative sur la rugosité.

Le tableau AV.8 résume toutes les valeurs de p trouvé pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AV.8 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque GFRP(C=1% et G=0,25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	175,775	35,1550	62,37	0,000
Nf	1	1,857	1,8569	3,29	0,097
Vc	1	0,160	0,1602	0,28	0,605
Nf*Nf	1	0,340	0,3399	0,60	0,454
Vc*Vc	1	0,261	0,2610	0,46	0,510
Vc*Nf	1	0,544	0,5437	0,96	0,347
Erreur	11	6,200	0,5637		
Total	16	181,975			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP 1% cire et avec 0.25% de graphène, il est clair que tous les facteurs n'ont pas un impact significatif sur la rugosité.

Évaluation et analyse de rugosité de la plaque GFRP (C=1% et G=2%)

Après le test de normalité sur les rugosités qu'on a trouvé que la valeur de p qui est inférieure au seuil qui vaut 0,05. Donc, on peut conclure que les données analysées ne suivent pas une distribution normale, donc on ne peut pas appliquer le test Anova. La figure AV.6 présente la distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab.

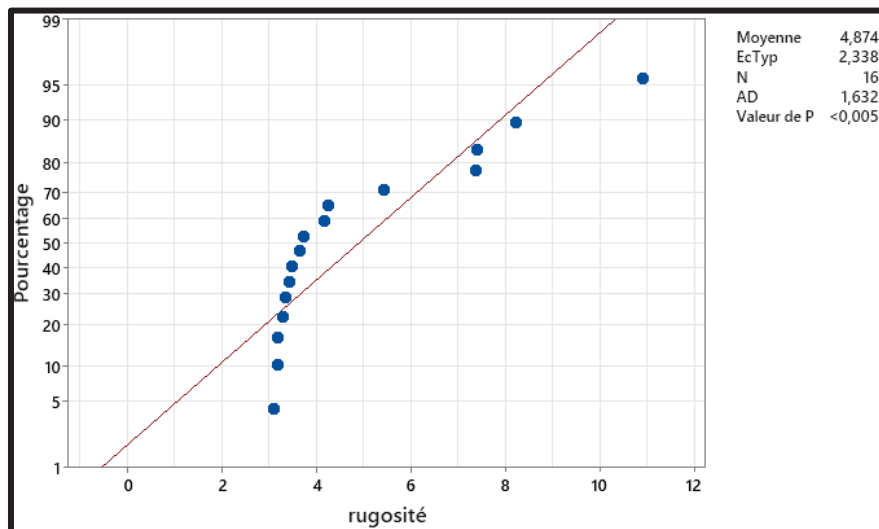


Figure AV.6 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab (C=1% et G=2%)

On a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Rugosité} = -27.3N_f + 0.0824V_c + 1088N_f^2 - 0.00004V_c^2 - 1.057V_cN_f \quad (\text{AV.7})$$

Ainsi que le tableau suivant résume toutes les valeurs de p trouvée pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AV.9 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque GFRP (C=1% et G=2%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	443,945	88,7891	53,85	0,000
Nf	1	0,342	0,3424	0,21	0,657
Vc	1	19,559	19,5591	11,86	0,005
Nf*Nf	1	4,269	4,2692	2,59	0,136
Vc*Vc	1	0,231	0,2306	0,14	0,716
Vc*Nf	1	39,414	39,4139	23,90	0,000
Erreur	11	18,137	1,6488		
Total	16	462,082			

En conclusion, après avoir étudié les résultats obtenus après le test de régression concernant la plaque GFRP avec 1% de cire et 2% de graphène, il est évident que le seul facteur qu'a un impact significatif sur la rugosité est la vitesse de coupe.

Évaluation et analyse de rugosité de la plaque GFRP (C=2% et G=0%)

À la suite du test de normalité effectué sur les rugosités, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,140, qui dépasse le seuil de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données analysées suivent une distribution normale, ce qui nous permet d'appliquer le test ANOVA. La figure AV.7 illustre la distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab.

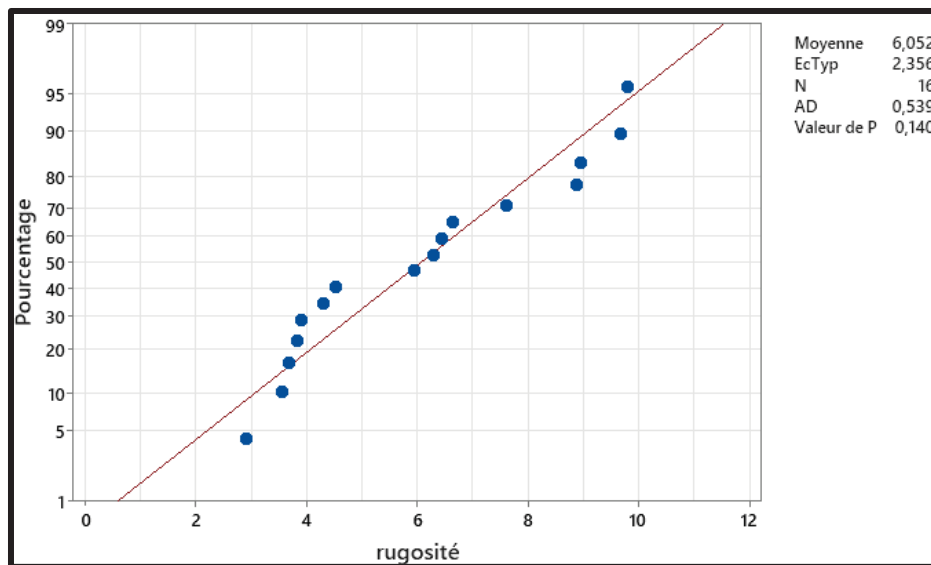


Figure AV.7 La distribution des données trouvé après un test de normalité sur MiniTab pour la plaque (C=2% et G=0%)

La valeur de P de vitesse de coupe vaut 0,025 la valeur est inférieur à la seuil 0,05. Donc la vitesse de coupe exerce une influence sur la rugosité. Le tableau AV.10 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AV.10 Analyse de variance après le test de la normalité sur MiniTab de la plaque GFRP (C=1% et G=2%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Nf	3	22,76	7,588	3,05	0,085
Vc	3	38,11	12,705	5,10	0,025
Erreur	9	22,41	2,490		
Total	15	83,28			

Ainsi, on a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Rugosité} = 64N_f + 0.0533V_c - 226N_f^2 + 0.000021V_c^2 - 0.584V_cN_f \quad (\text{AV.8})$$

Selon l'analyse de régression, tous les paramètres n'ont pas une incidence significative sur la rugosité.

Le tableau AV.11 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AV.11 Analyse de variance après le test de régression sur MiniTab de la plaque GFRP (C=1% et G=2%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	618,729	123,746	26,87	0,000
Nf	1	1,876	1,876	0,41	0,536
Vc	1	8,180	8,180	1,78	0,210
Nf*Nf	1	0,184	0,184	0,04	0,845
Vc*Vc	1	0,060	0,060	0,01	0,911
Vc*Nf	1	12,003	12,003	2,61	0,135
Erreur	11	50,666	4,606		
Total	16	669,395			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP 2% cire et avec 0% de graphène, il est clair que tous les facteurs n'ont pas un impact significatif sur la rugosité.

Évaluation et analyse de rugosité de la plaque GFRP (C=2% et G=0,25%)

À la suite du test de normalité effectué sur les rugosités, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,506, qui dépasse le seuil de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données analysées suivent une distribution normale, ce qui nous permet d'appliquer le test ANOVA. La figure AV.8 illustre la distribution des données obtenue après le test de normalité sur MiniTab.

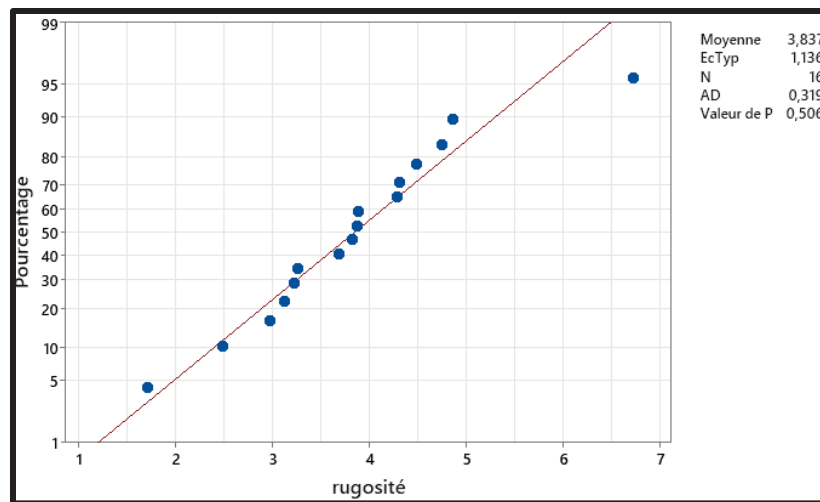


Figure AV.8 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab pour la plaque (C=2% et G=0,25%)

La valeur de P de vitesse d'avance et de vitesse de coupe dépassent le 0,05 de seuil. Donc ils n'exercent pas une influence sur la rugosité. Le tableau suivant présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AV.12 la distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab pour la plaque (C=2% et G=0.25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Nf	3	1,957	0,6523	0,75	0,550
Vc	3	9,566	3,1887	3,66	0,057
Erreur	9	7,844	0,8716		
Total	15	19,367			

Ainsi, on a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Rugosité} = 28.9N_f + 0.0319V_c + 249N_f^2 + 0.00001V_c^2 - 0.408V_cN_f \quad (\text{AV.9})$$

Selon l'analyse de régression, le seul facteur qui a une incidence significative sur la rugosité est $N_f \cdot V_c$

Le tableau AV.13 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AV.13 la distribution des données trouvée après un test de régression sur MiniTab pour la plaque (C=2% et G=0.25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	246,797	49,3594	66,77	0,000
Nf	1	0,386	0,3858	0,52	0,485
Vc	1	2,941	2,9411	3,98	0,071
Nf*Nf	1	0,223	0,2234	0,30	0,594
Vc*Vc	1	0,013	0,0129	0,02	0,897
Vc*Nf	1	5,876	5,8757	7,95	0,017
Erreur	11	8,132	0,7393		
Total	16	254,929			

En conclusion, après avoir examiné les résultats relatifs à la plaque GFRP 2% cire et avec 0,25% de graphène, il est clair le seul facteur qui a une incidence significative sur la rugosité est Nf*Vc

Évaluation et analyse de rugosité de la plaque GFRP (C=2% et G=2%)

Après le test de normalité sur les rugosités qu'on a trouvé que la valeur de p qui est inférieure au seuil qui vaut 0,05. Donc, on peut conclure que les données analysées ne suivent pas une distribution normale, donc on ne peut pas appliquer le test Anova. La figure suivante présente la distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab.

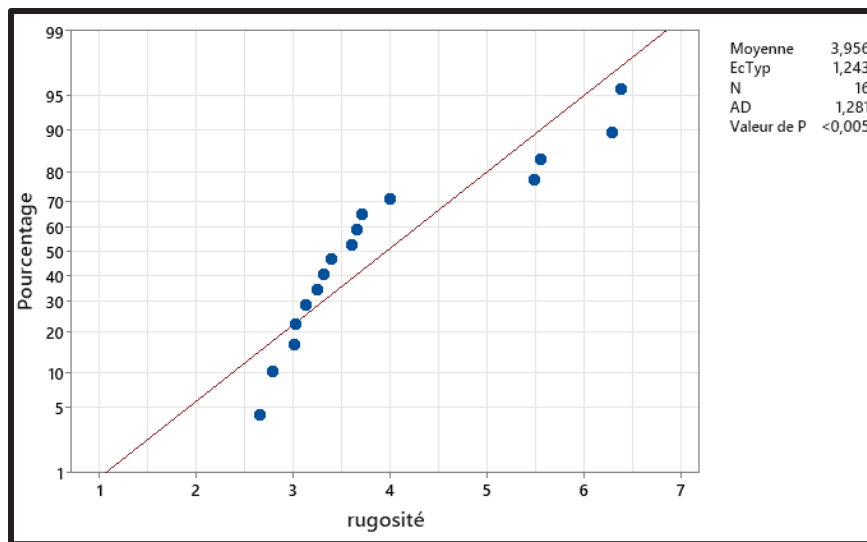


Figure AV.9 La distribution des données trouvée après un test de normalité sur MiniTab pour la plaque (C=2% et G=0,25%)

On a appliqué le test de régression ce qui donne un modèle significatif avec l'équation mathématique :

$$\text{Rugosité} = 103.9N_f + 0.0213V_c - 814N_f^2 + 0.000044V_c^2 - 0.375V_cN_f \quad (\text{AV.10})$$

Ainsi que le tableau AV.14 résume toutes les valeurs de p trouvées pour les différents facteurs de l'équation de modèle.

Tableau AV.14 la distribution des données trouvée après un test de régression sur MiniTab pour la plaque (C=2% et G=0,25%)

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	262,999	52,5999	54,85	0,000
Nf	1	4,981	4,9815	5,19	0,044
Vc	1	1,305	1,3046	1,36	0,268
Nf*Nf	1	2,394	2,3938	2,50	0,142
Vc*Vc	1	0,277	0,2771	0,29	0,602
Vc*Nf	1	4,955	4,9550	5,17	0,044
Erreur	11	10,548	0,9589		
Total	16	273,548			

En conclusion, après avoir étudié les résultats obtenus après le test de régression concernant la plaque GFRP avec 2% de cire et 2% de graphène, il est évident que la vitesse d'avance et le facteur $V_c \cdot N_f$ ont un impact significatif sur la rugosité.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adam, T. J., Exner, W., & Wierach, P. (2021). Taurine-Modified Boehmite Nanoparticles for GFRP Wind Turbine Rotor Blade Fatigue Life Enhancement. *Materials*, 14(22), 6997. <https://doi.org/10.3390/ma14226997>
- Azmi, A.I. (2015). Monitoring of tool wear using measured machining forces and neuro-fuzzy modelling approaches during machining of GFRP composites. *Advances in Engineering Software*, 82, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.12.010>
- Charfi, M. A. (2021). *Effect of Graphene Filler on the Mechanical, Electrical, and Thermal Properties of Polymer Composite*. (Mémoire de maîtrise. École de technologie supérieure, Montréal, QC). https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2675/1/CHARFI_Mohammed_Ali.pdf
- Chihi, M. (2021). *Étude des performances d'un composite carbone/époxy dopé par des nanocharges sous des sollicitations sévères*. (ENSTA Bretagne - École nationale supérieure de techniques avancées Bretagne ; Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sousse (Tunisie)). <https://theses.hal.science/tel-04051170>
- El-Ghaoui, K., Chatelain, J.-F., & Ouellet-Plamondon, C. (2019). Effect of Graphene on Machinability of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP). *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 78. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030078>
- El-Ghaoui, K., Chatelain, J.-F., Ouellet-Plamondon, C., & Mathieu, R. (2019). Effects of Nano Organoclay and Wax on the Machining Temperature and Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP). *Journal of Composites Science*, 3(3), 85. <https://doi.org/10.3390/jcs3030085>
- El-Hofy, M. H., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Sim, W. M., Pearson, D., & Harden, P. (2011). Factors Affecting Workpiece Surface Integrity in Slotting of CFRP. *Procedia Engineering*, 19, 94-99. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.085>
- Fei, B. (2018). 2 - High-performance fibers for textiles. Dans M. Miao & J. H. Xin (Éds), *Engineering of High-Performance Textiles* (pp. 27-58). (S.l.) : Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101273-4.00002-0>
- Gautam, S. S., Mishra, S., Dubey, A., Dev, O., Agarwal, S., & Dixit, A. K. (2023). Conducting fillers based multilayer polymer composites for terahertz absorber applications. *Bulletin of Materials Science*, 46(3), 115. <https://doi.org/10.1007/s12034-023-02960-0>
- Gohorianu, G. (2008). *Interactions entre les défauts d'usinage et la tenue en matage d'assemblages boulonnés en carbone/époxy*. PhD Thesis. Repéré à <http://www.theses.fr/2008TOU30046>

- Gornet, L., & Ijaz, H. (2011). A high-cyclic elastic fatigue damage model for carbon fibre epoxy matrix laminates with different mode mixtures. *Composites Part B: Engineering*, 42(5), 1173-1180. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.03.004>
- Hamedanianpour, H., & Chatelain, J. F. (2013). Effect of Tool Wear on Quality of Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminate during Edge Trimming. *Applied Mechanics and Materials*, 325-326, 34-39. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.325-326.34>
- Hou, Z. B., & Komanduri, R. (1997). Modeling of thermomechanical shear instability in machining. *International Journal of Mechanical Sciences*, 39(11), 1273-1314. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(97\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(97)00017-9)
- Imran, K. A., & Shivakumar, K. N. (2018). Enhancement of electrical conductivity of epoxy using graphene and determination of their thermo-mechanical properties. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 37(2), 118-133. <https://doi.org/10.1177/0731684417736143>
- Karabibene, N. (2017). *Optimisation des paramètres de détournage des composites à fibres de lin et comparaison avec le détournage des composites à fibres de verre*. (Mémoire de maîtrise. École de technologie supérieure, Montréal, QC). https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2066/2/KARABIBENE_Nouha-web.pdf
- Khlyustova, A., Cheng, Y., & Yang, R. (2020). Vapor-deposited functional polymer thin films in biological applications. *Journal of Materials Chemistry B*, 8(31), 6588-6609. <https://doi.org/10.1039/D0TB00681E>
- Kumar, N., & Singh, A. (2021). Study the effect of fiber orientation on mechanical properties of bidirectional basalt fiber reinforced epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1581-1587. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.707>
- Kuate Togue, H. (2019). *Influence des additifs sur l'usinabilité des composites GFRP* (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, QC). https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2340/1/KUATE_TOGUE_Honor%C3%A9.pdf
- Lee, D.-K., Yoo, J., Kim, H., Kang, B.-H., & Park, S.-H. (2022). Electrical and Thermal Properties of Carbon Nanotube Polymer Composites with Various Aspect Ratios. *Materials*, 15(4), 1356. <https://doi.org/10.3390/ma15041356>
- Lopresto, V., Caggiano, A., & Teti, R. (2016). High Performance Cutting of Fibre Reinforced Plastic Composite Materials. *Procedia CIRP*, 46, 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.079>
- Madhavadas, V., Srivastava, D., Chadha, U., Aravind Raj, S., Sultan, M. T. H., Shahar, F. S., & Shah, A. U. M. (2022). A review on metal additive manufacturing for intricately

- shaped aerospace components. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 39, 18-36. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.07.005>
- Mahmood, A. (2023). *Review of composite structures in aeronautic applications part 3*. (University of Toulouse III Paul Sabatier, France). https://msc-frp.org/wp-content/uploads/2023/10/MSc-Thesis_2022-23_UT3-NSA_AMahmood.pdf
- Mathieu, R., Charfi, M. A., Chatelain, J.-F., Ouellet-Plamondon, C., Serra, R., & Lebrun, G. (2022). Effect of graphene additive on cutting forces and temperature during the trimming process of CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(9-10), 3969-3981. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10150-1>
- Mrázová, M. (2013). Advanced composite materials of the future in aerospace industry. *INCAS BULLETIN*, 5, 139-150. <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2013.5.3.14>
- Nele, L., Caggiano, A., & Improta, I. (2021). 4 - Machining of composite materials. Dans K. Joseph, K. Oksman, G. George, R. Wilson, & S. Appukuttan (Éds), *Fiber Reinforced Composites* (pp. 83-111). (S.l.) : Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821090-1.00021-1>
- Nguyen-Dinh, N., Hejjaji, A., Zitoune, R., Bouvet, C., & Crouzeix, L. (2018). *Machining of FRP Composites: Surface Quality, Damage, and Material Integrity: Critical Review and Analysis: Behavior, Characterization, and Manufacturing* (pp. 1-35). https://doi.org/10.1007/978-981-13-2417-8_1/
- Okafor, C. E., Sunday, I., Ekwueme, G. O., Nwanna, E. C., & Ihueze, C. C. (2023). *Chapter Seven - Advances in design of polymer composite overwrap system for repair of pipeline damages induced by quasi-static and impact loading*. Dans V. Kushvaha, S. M. Rangappa, G. Balaganesan, & S. Siengchin (Éds), *Polymer Composite Systems in Pipeline Repair* (pp. 137-181). (S.l.) : Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99340-1.00007-1>
- Randviir, E. P., Brownson, D. A. C., & Banks, C. E. (2014). A decade of graphene research: production, applications and outlook. *Materials Today*, 17(9), 426-432. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.06.001>
- Sheikh-Ahmad, J., Urban, N., & Cheraghi, H. (2012). Machining damage in edge trimming of CFRP. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(7), 802-808. <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.648253>
- Sheikh-Ahmad, J. Y., Almaskari, F., & Hafeez, F. (2019). Thermal aspects in machining CFRPs: effect of cutter type and cutting parameters. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(9-12), 2569-2582. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2881-1>

- Slamani, M., Chatelain, J.-F., & Hamedanianpour, H. (2019). Influence of machining parameters on surface quality during high speed edge trimming of carbon fiber reinforced polymers. *International Journal of Material Forming*, 12(3), 331-353. <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1419-2>
- Soufiane, M., Kamel, Z., Oussama, D., & Slamani, M. (2021). *ANALYSE DE L'USINAGE DES COMPOSITES RENFORCÉS PAR FIBRES NATURELLES* (PhD Thesis. Mohamed Boudiaf University of M'sila, Algérie). file:///C:/Users/Admin/Downloads/ANALYSEDELUSINAGEDESCOMPOSITESRENFORCSPARFIBRESNATURELLES.pdf
- Stochioiu, C. (2020). *Contribution à l'étude du comportement visco-élastoplastique d'un composite structural lin/époxy*. (Doctoral dissertation, Université Bourgogne Franche-Comté; Universitatea politehnica (Bucarest)). <https://theses.hal.science/tel-03116627/>
- Tchouteng, T. S. (2020). *Étude sur le perçage en montage flexible d'un composite unidirectionnel à fibres de lin et matrice époxy* (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, QC). https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2559/2/TCHOUTENG_Thierry_Stephane-web.pdf
- Vallet, G.-M. (2014). *Elaboration de matériaux composites à matrice métallique (Cu-NTC) ayant des propriétés électriques améliorées pour application filaire*. (PhD Thesis, (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux).). <https://theses.hal.science/tel-01674183/>
- Wang, M., Yan, C., & Ma, L. (2012). *Graphene Nanocomposites. Composites and their Properties*, 17. Dans N. Hu (Éd.), (p. Ch. 2). Rijeka : IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/50840>
- Wang, Y., Wu, P., He, X., Zhao, W., Lan, X., & Lou, Y. (2022). Precise Modeling of Thermal and Strain Rate Effect on the Hardening Behavior of SiC/Al Composite. *Materials*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/ma15062000>
- Xu, Y., Cao, H., Xue, Y., Li, B., & Cai, W. (2018). Liquid-Phase Exfoliation of Graphene: An Overview on Exfoliation Media, Techniques, and Challenges. *Nanomaterials*, 8(11), 942. <https://doi.org/10.3390/nano8110942>
- Zenia, S. (2017). *Modélisation numérique de l'usinage des matériaux composites à matrice polymère et fibres longues de carbone* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine, France). <https://theses.hal.science/tel-01661293/>
- Zhang, D., Zhang, X.-M., Nie, G.-C., Yang, Z.-Y., & Ding, H. (2021). Characterization of material strain and thermal softening effects in the cutting process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 160, 103672. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103672>

Zhang, D., Zhang, X.-M., Nie, G.-C., Yang, Z.-Y., & Ding, H. (2021). Characterization of material strain and thermal softening effects in the cutting process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 160, 103672. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103672>