

Effet des additifs de graphène et de cire sur la qualité du perçage de matériaux composites en fibres de carbone

Par

Chabha KEBAILI

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 09 JANVIER 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE 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

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

LE 02 DÉCEMBRE 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à M. Jean-François Chatelain, directeur de ce mémoire, pour son accompagnement constant, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail. Mes remerciements vont également à M. Mohamed Slamani, codirecteur de mémoire, pour son soutien, ses précieuses recommandations, qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce projet.

Je remercie vivement le responsable du laboratoire LIFE, ainsi que les techniciens M. X. Rimpault, M. J. Grignon et M. N. Mazeghrane, pour leur assistance technique, leur disponibilité et la qualité de leurs conseils, qui m'ont été d'une aide précieuse.

Enfin, je voudrais adresser mes remerciements les plus sincères à ma famille, pour leur patience, leur amour et leur soutien indéfectible durant toutes ces années d'études. Une pensée particulière à mes amies Romi et Siwar, pour leur amitié, leur présence et leurs encouragements constants, qui ont rendu ce parcours plus riche et plus agréable.

PERÇAGE DE MATÉRIAUX COMPOSITES DE TYPE CFRP

Chabha KEBAILI

RÉSUMÉ

Les polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) sont de plus en plus utilisés pour leur légèreté, robustesse et résistance à la corrosion, notamment dans l'aéronautique et l'automobile. Leur usinage, surtout le perçage, est complexe en raison de leur anisotropie et hétérogénéité, ce qui nécessite un contrôle précis pour garantir des assemblages fiables. Ce processus peut provoquer des défauts mécaniques et thermiques, tout en accélérant l'usure des outils à cause de l'abrasivité des fibres. L'ajout d'additifs dans les composites pourrait améliorer leurs performances, mais leur impact sur l'usinage reste peu étudié.

Cette recherche porte sur la modification de la matrice époxy des composites à fibres de carbone (CFRP) par l'ajout de microparticules d'additifs, principalement du graphène et de la cire, afin d'étudier leur influence sur la température du foret pendant le perçage, ainsi que sur la qualité de surface et les efforts de coupe. Neuf types de plaques ont été fabriqués, comprenant un composite de référence sans additif et huit formulations avec différentes proportions de graphène (0%, 0,25%, 2%) et de cire (0%, 1%, 2%). Les essais de perçage ont été réalisés avec un foret unique à revêtement diamant CVD sous des paramètres de coupe optimaux, permettant d'évaluer l'effet combiné de ces additifs sur les performances d'usinage des CFRP.

Les résultats montrent que l'ajout de graphène et de cire dans les composites CFRP permet de réduire significativement la température de coupe, la force de perçage et la rugosité des trous, améliorant ainsi l'efficacité de l'usinage. Ces additifs diminuent également la délamination, renforçant la cohésion interne et la fiabilité des assemblages.

Mots clés : CFRP, perçage, Cire, Graphène, Température de coupe, Rugosité, délaminage

EFFET DES ADDITIFS DE GRAPHÈNE ET DE CIRE SUR LA QUALITÉ DU PERÇAGE DE MATÉRIAUX COMPOSITES DE TYPE

Chabha KEBAILI

ABSTRACT

Carbon fiber reinforced polymers (CFRP) are increasingly valued for their light weight, high strength, and corrosion resistance, especially in the aerospace and automotive industries. However, machining these materials particularly drilling is challenging due to their anisotropic and heterogeneous structure, requiring precise process control to ensure dependable assemblies. This machining can induce mechanical and thermal defects and also accelerates tool wear because of the abrasive nature of the fibers. Although adding additives to composites holds promise for performance enhancement, their effects on the machining process remain insufficiently explored.

This study examines the modification of the epoxy matrix in CFRP composites by adding microparticle additives, specifically graphene and wax, to evaluate their effect on drill bit temperature during drilling. Nine sample types, including eight formulations with varying graphene (0%, 0.25%, 2%) and wax (0%, 1%, 2%) contents, were tested under optimal cutting conditions using a diamond-coated drill bit. The research assesses how these additives influence key machining factors such as surface finish and cutting forces.

The findings reveal that incorporating graphene and wax into CFRP composites significantly lowers the cutting temperature, drilling force, and surface roughness of the holes, thereby enhancing machining efficiency. In addition, these additives reduce delamination, improving the internal cohesion and reliability of the resulting assemblies.

Keywords: CFRP, drilling, wax, graphene, surface roughness, delamination

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE LITTÉRAIRE	3
1.1 Les matériaux composites.....	3
1.2 Classification des matrices.....	4
1.3 Classification des renforts.....	5
1.4 Procédés de mise en œuvre des matériaux composites.....	6
1.5 Les matériaux composites à fibres de carbone	8
1.6 Fabrication et propriétés de la fibre de carbone.....	11
1.7 Nature des fibres de carbone employées dans la fabrication des composites.....	12
1.8 Les additifs utilisés dans les matériaux composites à fibres de carbone	13
1.9 Usinage des matériaux composites à fibres de carbone.....	14
1.10 Caractéristiques des procédés d'usinage des composites	15
1.11 Le perçage des matériaux composites.....	16
1.12 Les caractéristiques des forets et leurs influences sur le perçage	18
1.13 Analyse du processus de formation des copeaux en usinage des composites	19
1.13.1 Effet de l'angle de coupe sur le processus de formation du copeau	21
1.13.2 Efforts de coupe en usinage des composites.....	23
1.13.2.1 Effet de l'angle de coupe sur les efforts d'usinage	24
1.13.2.2 Effet de l'angle de dépouille sur les forces d'avance F_t	25
1.14 Les défauts produits lors de l'usinage des matériaux composites	26
1.14.1 Délaminage du composite.....	26
1.14.2 Rugosité de surface	28
1.14.3 Délaminage de type II ou III (bourrelet/ fibres non coupées).....	29
1.15 Influence des additifs sur l'usinage.....	30
1.15.1 Influence de l'additif de graphène sur l'usinage des composites	31
1.15.2 Influence de l'additif de cire sur le perçage des composites	34
1.16 Conclusion	35
1.17 Objectifs de recherche.....	36
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL	39
2.1 Introduction.....	39

2.2	Description du plan expérience.....	39
2.3	Le choix des matériaux	41
2.3.1	Matrice de résine époxy	41
2.3.2	Fibres de carbone	42
2.3.3	Additifs de graphène et de cire	43
2.4	Élaboration des plaques	43
2.4.1	Mélange des additifs	44
2.4.2	Élimination des bulles d'air	45
2.5	Description du protocole d'usinage des plaques en résine époxy modifiée	48
2.6	Perçage des plaques échantillons	49
2.6.1	Machine-outil à commande numérique (CNC).....	49
2.6.2	Outil de coupe et acquisition de sa température pendant l'usinage	50
2.7	Mesure des forces de perçage	52
2.8	Mesure des températures de coupe	54
2.9	Mesure de délaminage et longueur des fibres non coupées	54
2.10	Mesure de rugosité.....	56
CHAPITRE 3 ANALYSE DES RÉSULTATS.....		59
3.1	Effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur la force perçage	59
3.2	Influence de la vitesse de coupe sur la force de perçage de l'ensemble des plaques composites.....	60
3.3	Effet de la vitesse de coupe sur la température.....	62
3.4	Effet de la vitesse d'avance sur la température.....	64
3.5	Impact des vitesses de coupe sur le délaminage	65
3.6	Impact des vitesses d'avance sur le délaminage	67
3.7	Effet de la vitesse de coupe sur la longueur des fibres non coupées	68
3.8	Effet de la vitesse d'avance sur la longueur des fibres non coupées	70
3.9	Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface.....	71
3.10	Effet de la vitesse d'avance sur la rugosité de surface.....	73
3.11	Influence du graphène et de la cire sur la performance du perçage.....	75
3.11.1	Influence des additifs sur la force de coupe.....	75
3.11.2	Influence des additifs sur la température	78
3.11.3	Effet des additifs sur la rugosité.....	82
3.12	Analyse comparative des plaques en fonction des teneurs en cire et en graphène	86

3.12.1	Force de coupe	86
3.12.2	Température de coupe.....	88
3.12.3	Rugosité de surface	89
3.12.4	Facteur de délaminage	90
3.12.5	Longueur des fibres non coupées.....	91
3.13	Analyse de l'ajout des additifs de cire et de graphène sur le perçage des CFRP	93
CONCLUSION.....		95
RECOMMENDATIONS.....		97
ANNEXE I Code MATLAB pour tracer un graphe de trois surfaces différentes		101
ANNEXE II Analyses de régression des forces du perçage		103
ANNEXE III Analyses de régression pour les températures du perçage		123
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		141

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Les pourcentages des produits utilisés lors de la production des plaques 40
Tableau 2.2	Paramètres de coupe40
Tableau 2.3	Caractéristiques principales du centre d'usinage Huron K2x1050
Tableau 2.4	Paramètres de réglage de profilomètre.56
Tableau 3.1	Améliorations (%) par rapport au composite témoin.....86

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Les matériaux composites(Brek, 2023)4
Figure 1.2	Classification des matrice(Brek, 2023).....5
Figure 1.3	Type des renforts.....6
Figure 1.4	Principe du procédé de fabrication des fibres de carbone ex-PAN (Toray, s. d.).....12
Figure 1.5	(1) Bobine (2) Nappes de tissu sec (3) Nappes unies (4) fibres coupées et broyées (Comité d’experts spécialisés et al., 2010).....13
Figure 1.6	Différents types d'usinages (DESSARTHE, 1997).....15
Figure 1.7	Arêtes et surfaces de la partie active d'un foret de perçage (Zenia, 2017).17
Figure 1.8	outil de perçage CVD (TELECON, s. d.)18
Figure 1.9	Critère de qualité pour une opération de perçage (Gohorianu, 2008).....19
Figure 1.10	Étude expérimentale de la formation de copeaux pour :(a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = +45^\circ$, (c) $\theta = +90^\circ$, (d) $\theta = -45^\circ$ Zitoune et al. (Zitoune et al., 2005) à gauche et Wang et al. (D. H. Wang et al., 1995) à droite21
Figure 1.11	Mécanisme de formation de copeaux (Fluids and Lubricants, 2022)22
Figure 1.12	Schéma de l’angle de coupe de la fibre (Ning et al., 2022)23
Figure 1.13	Effet de l'angle de coupe sur (a) les efforts de coupe et (b) les efforts d’avance (Kaneeda, 1991)25
Figure 1.14	Quantification du facteur de délaminage à partir de la surface d'une image microscopique (John & Kumaran, 2020).....27
Figure 1.15	Variation de la rugosité de surface selon le nombre de trous percés et de la longueur totale de perçage (F. Wang et al., 2017)28
Figure 1.16	Micrographie des fibres non coupées (John & Kumaran, 2020)29
Figure 1.17	Effets de graphène sur la force d'usinage de fibres de carbone31
Figure 1.18	Effets de graphène sur la force d'usinage de fibres de carbone32

Figure 1.19	Effets du graphène sur la rugosité de surface (El-Ghaoui et al., 2019)33
Figure 1.20	Effets du graphène sur la température de coupe (El-Ghaoui et al., 2019).33
Figure 1.21	Effets de la cire sur la force de perçage des GFRP (Slamani et al., 2025) 35
Figure 2.1	Résine et durcisseur42
Figure 2.2	Fibres de carbone42
Figure 2.3	Protocole d'élaboration des composites pour avoir une meilleure homogénéisation44
Figure 2.4	Préparation d'un mélange d'époxy incorporant du graphène et de la cire dans un bain de glace.45
Figure 2.5	a) étuve b) mélange de cire, graphène ajoutée à la résine.....46
Figure 2.6	a) Préparation du plaque CFRP b) Presse hydraulique employée pour le moulage et la consolidation du matériau composite47
Figure 2.7	Étapes de découpe et de perçage des composites a) découpe des stratifiés, b) perçage du gabarit, c) finition des plaques, d) gabarit de perçage.....48
Figure 2.8	Schéma de répartition des trous pour les essais d'usinage49
Figure 2.9	Machine CNC Huron K2x1049
Figure 2.10	Montage de l'outil de coupe et du dispositif d'usinage sur la table dynamométrique51
Figure 2.11	Caméra thermique dans son boîtier protecteur en aluminium52
Figure 2.12	Analyse de la force de poussée au cours du perçage d'un composite (Thierry Stéphane TCHOUTENG, 2020).....53
Figure 2.13	Analyse de la température de l'outil après perçage, réalisée avec les paramètres de ($V_c=50\text{mm/min}$ et $N_f=0.02\text{mm/rev}$) à l'aide du logiciel GRAYESS IRT Analyzer54
Figure 2.14	Observation microscopique : analyse de surface et mesure de diamètre...55
Figure 2.15	Observation microscopique : mesure de longueur des fibres non coupées56
Figure 2.16	Signaux de mesures de rugosités en seul point de trou.....57
Figure 3.1	Effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur la force de poussée60

Figure 3.2	Variation de la force en fonction de la vitesse de coupe sans égard à la vitesse d'avance61
Figure 3.3	Variation de la température en fonction de la vitesse de coupe sans égard à la vitesse d'avance63
Figure 3.4	Variation de la température en fonction de l'avance sans égard à la vitesse de coupe64
Figure 3.5	Variation du facteur de délaminage en fonction de la vitesse de coupe sans égard à la vitesse d'avance.....66
Figure 3.6	Évaluation du délaminage en fonction de la vitesse d'avance sans égard à la vitesse de coupe67
Figure 3.7	Variation de la longueur de fibres non coupées en fonction de la vitesse de coupe sans égard à la vitesse d'avance69
Figure 3.8	Influence de la vitesse d'avance sur la longueur des fibres non coupées sans égard à la vitesse de coupe70
Figure 3.9	Évolution de la rugosité de surface en fonction des vitesses de coupe sans égard à la vitesse d'avance sans égard à la vitesse d'avance72
Figure 3.10	Évolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance sans égard à la vitesse de coupe.....73
Figure 3.11	Effet combiné de 0 % de cire et du graphène sur les forces moyennes de perçage76
Figure 3.12	Effet combiné de 1 % de cire et du graphène sur les forces moyennes de perçage77
Figure 3.13	Effet combiné de 2 % de cire et du graphène sur les forces moyennes de perçage78
Figure 3.14	Influence du graphène sur les températures moyennes de perçage des composites CFRP79
Figure 3.15	Effet combiné de 1 % de cire et du graphène sur les températures moyennes de perçage80
Figure 3.16	Effet combiné de 2 % de cire et du graphène sur les températures moyennes de perçage81
Figure 3.17	Influence du pourcentage de graphène sur la rugosité moyenne des plaques composites en fonction des paramètres de perçage83

Figure 3.18	Effet combiné de la cire et du graphène sur la rugosité moyenne des plaques composites en fonction des vitesses de coupe et d'avance.....	84
Figure 3.19	Influence d'un taux de 2 % de cire et de l'ajout de graphène sur la rugosité moyenne des plaques composites en fonction des vitesses de coupe et d'avance	85
Figure 3.20	Effet des pourcentages de cire et de graphène sur la force moyenne	87
Figure 3.21	Effet des pourcentages de cire et de graphène sur la température moyenne	88
Figure 3.22	Effet des pourcentages de cire et de graphène sur la rugosité moyenne....	90
Figure 3.23	Influence de la cire et du graphène sur le délaminage (Fd) des plaques CFRP.....	91
Figure 3.24	Influence de la cire et du graphène sur la longueur des fibres non coupées après perçage des plaques CFRP	92

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastic/Polymère Renforcé de Fibres de Carbone
CVD	Outil avec revêtement de diamant cristallin
PCD	Outil avec revêtement en polycristallin
Wd	Poids du durcisseur (g)
Wg	Pourcentage en poids du graphène
Wc	Pourcentage en poids de la cire
Wep	Poids de l'époxy (g)
WA	Pourcentage en poids du graphène et de la cire combinée (%)
Wt	Poids total (g).
BDS	Broadband Dielectric Spectroscopy /Spectroscopie diélectrique
CNC	Computer Numerical Control/Machine-outil à commande numérique
DSC	Differential Scanning Calorimetry/Calorimétrie différentielle à balayage
FRP	Fibre Reinforced Plastic/Plastique renforcé de fibres
PAN	Polyacrylnitrique
PCD	Polycrystalline Diamond/ Diamant Polycristallin
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

θ	(°)	Angle d'orientation des fibres par rapport à l'avance de coupe
M	(g)	Masse
R_a	(μm)	Rugosité arithmétique
V_c	(m/min)	Vitesse de coupe
V_a	(mm/tr)	Vitesse d'avance
T	(°C)	Température de transition vitreuse

INTRODUCTION

Les composites à fibres de carbone (CFRP) sont de plus en plus adoptés dans des domaines comme l'aéronautique, l'automobile et d'autres industries, en raison de leur excellent rapport résistance/poids et de leur durabilité face à la corrosion (Chen et al., 2023). Ces caractéristiques font du CFRP un matériau de choix pour les usages nécessitant à la fois légèreté et solidité, tels que les composants aéronautiques ou les véhicules de performance élevée (Pérez-Salinas et al., 2023).

Cependant, l'usinage des CFRP présente d'importantes difficultés, en particulier lors du perçage, en raison de l'anisotropie et de l'hétérogénéité propres à ces composites. L'étape de perçage est déterminante, car elle conditionne la fiabilité des assemblages mécaniques tels que ceux obtenus avec des vis, des rivets ou des boulons. Ainsi, il est essentiel de bien maîtriser cette opération afin de garantir la qualité des trous, paramètre déterminant pour la robustesse et la durabilité des assemblages finaux (Xu et al., 2023).

Par ailleurs, le domaine de l'usinage des CFRP demeure en pleine évolution, étant encore relativement jeune et confronté à des problématiques inédites. Les dommages occasionnés lors de l'usinage peuvent être de nature mécanique (délamination, arrachement des fibres, fissuration de la matrice) ou thermique (dégradation de la matrice sous l'effet de la chaleur générée par friction). Les résines, notamment l'époxy, étant peu résistantes aux hautes températures, l'intégrité de surface peut rapidement être compromise, ce qui engendre des défauts susceptibles d'affaiblir le composant final (Alarifi, 2023).

L'usinage des composites provoque une usure rapide des outils à cause de l'abrasivité des fibres. L'ajout d'additifs lors de la fabrication peut améliorer les performances mécaniques et certaines propriétés fonctionnelles, mais leur influence sur le comportement en usinage reste encore peu étudiée.

Dans ce contexte, la réalisation de trous dans les composites CFRP demeure une opération délicate, principalement en raison de la nécessité de limiter la délamination et de réduire les efforts de coupe. Afin d'apporter des éléments de réponse à ces enjeux, la présente étude s'est

concentrée sur des composites époxy renforcés de fibres de carbone élaborés par la méthode du « hand lay-up ».

Dans cette démarche, le choix du graphène et de la cire comme additifs s'est imposé, étant donné que peu de travaux se sont penchés sur leur intégration dans ce type de matériaux. Le graphène, en particulier, présente une conductivité thermique élevée qui pourrait s'avérer particulièrement bénéfique pour atténuer les problèmes mécaniques et thermiques rencontrés lors de l'usinage.

Les échantillons obtenus ont ensuite été soumis à des opérations de perçage, pour lesquelles plusieurs paramètres ont été systématiquement variés : la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et le pourcentage d'additifs incorporés. L'objectif principal de cette étude est d'identifier la combinaison optimale de ces facteurs, dans le but d'améliorer les performances de perçage, notamment en réduisant la force de coupe, la délamination et la rugosité de surface.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres principaux : Le premier chapitre est consacré à une revue de la littérature. Il présente un état de l'art détaillé sur les matériaux composites ainsi que sur les différentes techniques d'usinage qui leur sont appliquées, afin de situer la problématique dans le contexte scientifique actuel.

Le deuxième chapitre, intitulé « Méthodologie expérimentale », expose de manière approfondie les démarches adoptées ainsi que les outils et équipements utilisés pour la fabrication des plaques composites et leur usinage. Ce chapitre précise également les conditions expérimentales retenues pour la réalisation des essais.

Enfin, le troisième chapitre présente l'analyse et la discussion des résultats issus des expériences menées. Les observations obtenues sont confrontées aux données de la littérature, permettant ainsi d'évaluer la pertinence des travaux réalisés. Ce chapitre se conclut par une synthèse, des conclusions et l'ouverture sur des perspectives pour de futures recherches.

CHAPITRE 1

REVUE LITTÉRAIRE

1.1 Les matériaux composites

En parallèle avec le progrès des polymères et des métaux, les composites prennent une place croissante dans la fabrication additive. Ils associent au moins deux éléments : un liant et un renfort, ou encore une matrice et une charge.

Les plus courants sont les polymères renforcés par des fibres de carbone, de verre ou de Kevlar. On y ajoute des charges pour améliorer la conductivité, la résistance, la ténacité ou la rigidité. Ces renforts sont ensuite intégrés dans une matrice, thermodurcissable ou thermoplastique, qui assure la cohésion et maintient la structure. Les composites offrent des synergies résultant de la combinaison de matériaux, dépassant ainsi les performances des thermoplastiques classiques sans charge tout en conservant une densité faible. Ils peuvent même rivaliser avec les métaux, avec plusieurs couches de fibre de carbone pouvant être plus résistantes que l'acier tout en étant dix fois plus légères (Giorgio, 2021).

Un matériau composite se compose ainsi de plusieurs éléments tel que montré sur la figure 1.1.

- La matrice maintient les renforts en place, transmet les contraintes mécaniques et confère des propriétés chimiques et thermiques spécifiques. Elle peut être thermodurcissable, thermoplastique, métallique ou biodégradable.
- Les additifs, issus de sources minérales, végétales, synthétiques ou organiques, sont incorporés à la résine pour apporter des fonctionnalités particulières au matériau fini.
- Les renforts, surtout présents sous forme de fibres (continues, discontinues ou particulières, d'origine organique ou minérale) tel que montré sur la figure 1.1, sont déterminants pour les performances mécaniques, notamment la résistance à la traction et la rigidité. Ils prennent la forme de filaments de types organiques ou minéraux, et se déclinent en particules, fibres discontinues ou fibres continues.

Selon leur nature (verre, carbone, aramide, céramique ou naturelle), ils confèrent au matériau des performances adaptées aux applications variées, de l'industrie écologique à l'aéronautique. Ainsi, la conception des matériaux composites, par la variété de leurs composants et la multiplicité des formes de renforts, ouvre la voie à des applications toujours plus diversifiées et performantes dans l'industrie.

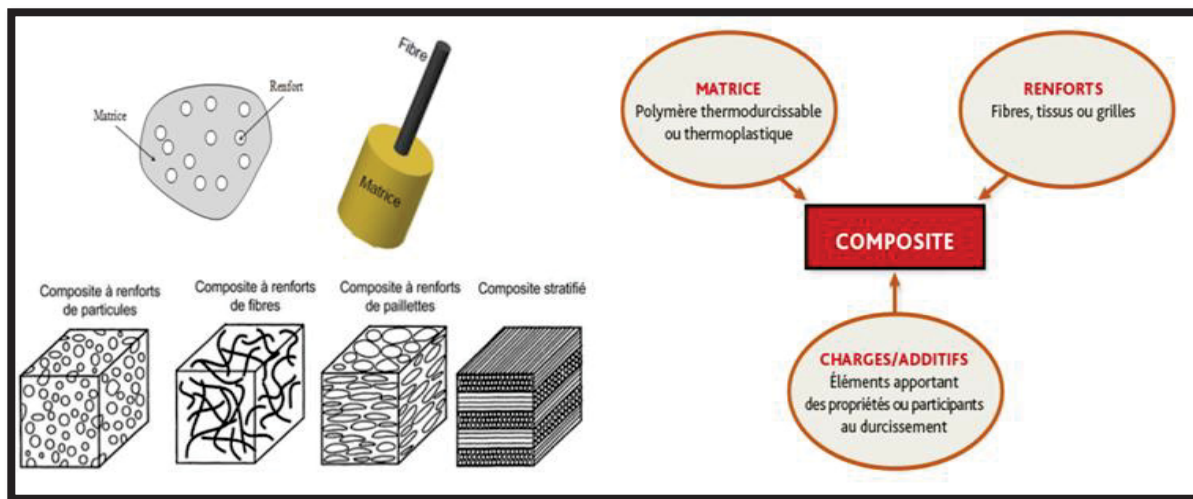


Figure 1.1 Les matériaux composites(Brek, 2023)

1.2 Classification des matrices

La matrice joue un rôle central dans un composite. Elle relie les renforts et assure leur répartition uniforme. On distingue plusieurs types de matrices, comme montré à la figure 1.2. Chacune possède des propriétés particulières. Les résines thermodurcissables, tel l'époxy, durcissent de manière permanente lors de la polymérisation. Ce processus est irréversible. Les résines thermoplastiques, elles, offrent une résistance élevée à la chaleur et aux agents chimiques, ainsi qu'une possibilité de recyclage (CHAUSOY, 2021). Elles ont également la capacité à se former par chauffage et à durcir lors du refroidissement avec une transformation réversible.

D'autres types de matrices incluent les matrices métalliques et les matrices céramiques, chacune apportant des avantages uniques en fonction de l'application souhaitée.

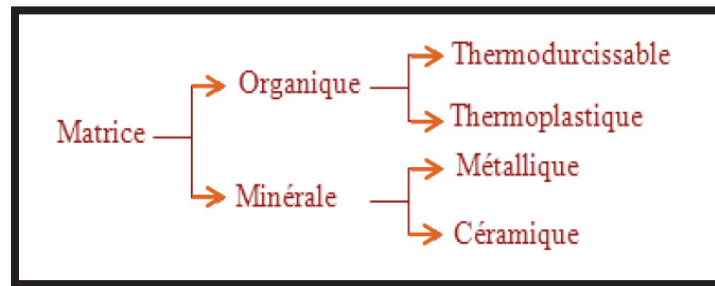


Figure 1.2 Classification des matrice(Brek, 2023)

1.3 Classification des renforts

Les fibres, utilisées comme renforts, augmentent la résistance et la rigidité des composites. Comme montré à la figure 1.3, elles peuvent être continues ou discontinues, et influencent directement les propriétés mécaniques finales du matériau. La fibre de verre reste un choix courant, grâce à ses propriétés globales. La fibre de carbone, en revanche, est privilégiée pour ses performances supérieures. À côté de ces renforts fibreux, on trouve les composites renforcés par particules. Ils intègrent des charges sous forme de particules afin d'améliorer des propriétés ciblées, comme la rigidité ou la résistance à la température.

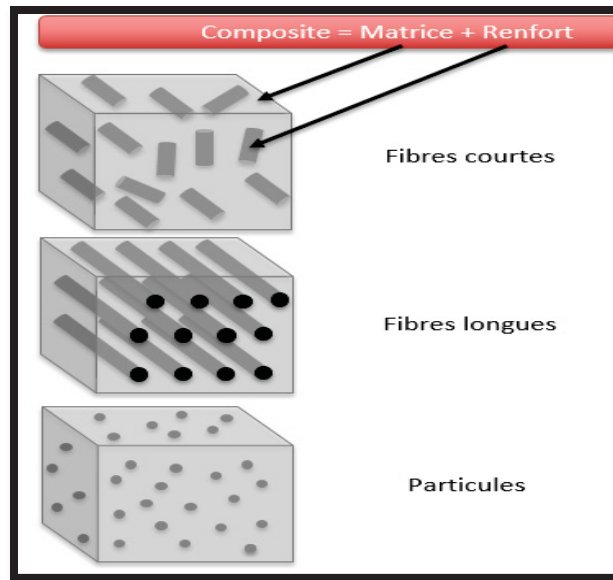


Figure 1.3 Type des renforts

1.4 Procédés de mise en œuvre des matériaux composites

- Procédé de moulage au contact

Le procédé de moulage au contact (ou voie humide, moule ouvert, TD) est utilisé pour les composites tels que le verre/polyester et le verre vinyl/ester. Ses avantages comprennent sa simplicité de mise en œuvre, la liberté de forme et de taille offerte, ainsi que le faible investissement initial requis. Cependant, ses inconvénients comprennent le coût élevé de la main-d'œuvre, la toxicité pendant la mise en œuvre due à la libération de styrène, et le manque de reproductibilité du procédé (Campus industrie, 2015).

- Procédé de projection simultanée de fibres et de résine

Le procédé de projection de fibres et de résine est utilisé pour fabriquer des composites comme le verre/polyester ou le verre/vinylester. Il offre plusieurs avantages : une productivité plus élevée que le moulage au contact, une grande liberté de forme et de taille, ainsi qu'une possibilité d'automatisation.

Mais ce procédé présente aussi des limites. Il génère des déchets périphériques, donne des propriétés mécaniques réduites et rend le contrôle de l'épaisseur difficile. À cela s'ajoute un risque de toxicité pendant la mise en œuvre (Ruch, 2015).

- Moulage RTM

Le processus de moulage par transfert de résine (RTM) implique la disposition des nappes de fibres, la fermeture du moule, le remplissage du moule avec la résine, puis le démoulage. Les avantages de cette méthode sont l'absence d'émission de composés organiques volatils (COV), le contrôle de l'épaisseur régulier, et l'obtention de surfaces lisses (Campus industrie, 2015).

- Procédé d'infusion

Le procédé d'infusion offre l'avantage de recourir à un moule économique, ce qui le rend intéressant pour la fabrication de pièces de très grande taille, comme un pont de catamaran de 20 mètres avec un temps d'infusion de 4 heures. Cependant, son inconvénient réside dans l'utilisation de nombreux consommables, entraînant la production de déchets importants (Campus industrie, 2015).

- Procédé de compression SMC-BMC

Les procédés de compression SMC et BMC impliquent l'utilisation de deux types de composés soit le SMC, ou « Compound » de moulage en feuille, pour la fabrication de grandes pièces à faible épaisseur, et le BMC, ou « Compound » de moulage en vrac, pour les pièces épaisses. Ces composés sont constitués de fibres de verre, de charges minérales, et d'une résine non saturée catalysée et inhibée, puis sont soumis à une presse à chaud avec une pression de 50 à 100 bar et des températures comprises entre 120 et 150 °C (Campus industrie, 2015).

- Procédé de pultrusion

La pultrusion est un procédé simple : on étire des fibres imprégnées de résine à travers une filière chauffée. Le résultat est un profilé solide et léger. Ces profilés servent à renforcer ou à réaliser des structures durables. On les retrouve dans de nombreux secteurs, où leur légèreté, leur résistance et leur durabilité sont des atouts majeurs. Ils permettent de produire des barres, des lames, des poutres ou des armatures. Les formes sont variées et adaptées aux environnements exigeants. Leur mise en œuvre est facile. Ils résistent à la corrosion et

demandent peu d'entretien. Ces qualités en font des solutions compétitives pour le bâtiment, l'industrie et même le sport. (Campus industrie, 2015).

- **Procédé d'enroulement filamentaire**

Ce procédé consiste à enrouler des fibres imprégnées autour d'un mandrin en rotation. Ses avantages incluent un contrôle précis de l'orientation des fibres, des propriétés mécaniques exceptionnelles grâce à une forte concentration de fibres et une surface intérieure lisse. Cependant, Ce procédé demande un investissement financier élevé. Il reste aussi relativement lent. Il est principalement utilisé dans la fabrication de tubes et de profils destinés à des applications exigeantes telles que les réservoirs, les silos et les pales d'hélicoptère (Ruch, 2015).

1.5 Les matériaux composites à fibres de carbone

Les polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) sont des composites à haute performance. Ils se distinguent par des propriétés mécaniques et physiques remarquables : une résistance spécifique élevée, une rigidité importante, une grande stabilité thermique et une résistance accrue à la corrosion. Ces matériaux combinent deux éléments étroitement liés : des fibres de carbone qui assurent le renfort, et une matrice polymère qui garantit la cohésion. Cette combinaison leur confère des performances exceptionnelles. Grâce à ces qualités, les CFRP s'imposent comme une alternative crédible aux matériaux métalliques classiques. On utilise les CFRP dans l'aéronautique, l'automobile et la défense. On les retrouve aussi dans les sports et loisirs. Ils sont sélectionnés dès qu'une application exige un matériau structurel avec un rapport résistance/poids et rigidité/poids très élevé.

1.5.1 Aéronautique et espace

Les matériaux composites renforcés de fibres de carbone occupent une place prépondérante dans le secteur aéronautique. Leur force réside dans l'alliance de légèreté et de robustesse. Une fois intégrés aux structures, les composites allègent considérablement le poids des avions. Cette baisse de masse réduit la consommation de carburant. Elle accroît aussi la fiabilité des

appareils, qui gagnent en performance et en durabilité. De plus, ces composites améliorent la performance globale des avions en favorisant une meilleure efficacité énergétique, une aérodynamique optimisée et une réduction des vibrations et des bruits, assurant un vol plus confortable (Lessard, 2022). La transition de cette industrie vers les composites à fibres de carbone a été marquée par des progrès significatifs, avec des avancées notables sur des appareils emblématiques tels que le Boeing 787 et l'Airbus A350.

1.5.2 Automobile

Les matériaux composites renforcés par des fibres de carbone sont de plus en plus utilisés dans l'automobile en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques. Leur combinaison de légèreté et de résistance permet de diminuer la masse globale des véhicules et d'accroître leur rendement énergétique. Ils sont utilisés dans divers composants tels que le châssis, la carrosserie et les intérieurs, renforçant ainsi la solidité et la sécurité des véhicules, tout en offrant une meilleure résistance à la corrosion pour prolonger leur durée de vie. Ils renforcent également la sécurité en absorbant l'énergie lors des collisions, ce qui réduit les risques de blessures. Leur rigidité et leur légèreté améliorent les performances globales des voitures en leur offrant une meilleure tenue de route, une stabilité accrue en virage et une réactivité améliorée. De plus, ils sont également utilisés dans diverses applications comme les arbres de transmission, les réservoirs NGV et les structures des trains TGV (Lambole, 2023).

1.5.3 Sports et loisirs

Grâce à leur combinaison unique de résistance, de légèreté et de rigidité, les composites en fibres de carbone sont devenus incontournables dans la fabrication de matériel sportif.

Ces composites sont employés dans une gamme variée d'articles tels que les raquettes de tennis, les clubs de golf, les bâtons de hockey, les casques et les cadres de vélos et les skis pour n'en nommer que quelques-uns (GONZALEZ, 2022) et (Marchal, 2023). Leur utilisation améliore significativement les performances des athlètes en réduisant le poids de l'équipement, augmentant la résistance et optimisant la transmission de puissance, révolutionnant ainsi la conception des équipements sportifs et ouvrant de nouvelles opportunités pour les sportifs professionnels et amateurs (Laffage-Cosnier, 2023).

Les avantages des composites à fibres de carbone dans l'industrie sportive incluent leur légèreté, leur rigidité, leur résistance et leur esthétique, permettant la création d'équipements innovants et attrayants, adaptés à une utilisation en extérieur dans diverses conditions climatiques.

1.5.4 Autres domaines d'application

En plus de leurs applications largement exploitées dans les secteurs aéronautique, automobile et sportif, les composites à fibres de carbone interviennent également dans une multitude d'autres domaines. Grâce à leur légèreté, leur résistance élevée et leur grande durabilité, ils offrent des solutions performantes adaptées à des besoins variés, notamment dans les secteurs biomédical, énergétique et du génie civil. Les principaux domaines concernés sont présentés ci-après. Dans le domaine biomédical, ces matériaux contribuent à améliorer significativement la qualité de vie des patients grâce à des prothèses, implants et fauteuils roulants plus légers, plus confortables et plus fiables (Le Gentil, 2023). Leur utilisation favorise une meilleure mobilité et une réduction des complications post-opératoires.

Le secteur du bâtiment et du génie civil bénéficie également de leurs performances, notamment pour le renforcement des structures. Leur rapport résistance-poids avantageux, combiné à une excellente durabilité, permet de consolider efficacement ponts, fondations et éléments porteurs tout en limitant les contraintes liées au poids des matériaux traditionnels (Tarifa, 2023).

Dans le domaine énergétique, en particulier dans l'« offshore », la fibre de carbone se distingue par sa résistance à la corrosion marine, sa légèreté et sa rigidité. Elle est utilisée dans les tendons offshore, les élévateurs sous-marins ou encore le renforcement des pales d'éoliennes, contribuant à améliorer leur performance et leur durabilité. Son emploi en construction navale permet également d'alléger les coques et de réduire la consommation de carburant, optimisant ainsi l'efficacité globale des systèmes énergétiques (Dupupet, 2008).

Ainsi, la polyvalence des composites à fibres de carbone en fait un matériau incontournable dans la recherche de solutions performantes, durables et adaptées aux défis technologiques actuels.

1.6 Fabrication et propriétés de la fibre de carbone

Les fibres de carbone ont un diamètre d'environ 5 à 10 μm , sont composées principalement d'atomes de carbone. Elles proviennent en général de fibres de polyacrylonitrile (PAN), transformées par oxydation puis carbonisation dans des fours spécialisés. Leur structure interne se forme de microcristaux longs et plats, disposés parallèlement à l'axe des fibres (Afsset, 2010). La plupart des précurseurs PAN contiennent de 1 000 à 12 000 filaments, étirés pour obtenir une orientation axiale préférentielle, bien que certains puissent contenir jusqu'à 320 000 filaments (DUPUPET, 2008). Le processus complet de fabrication des fibres de carbone à partir de PAN est illustré dans la figure 1.4. L'étape d'oxydation, réalisée à des températures de 200 à 300 °C sous air, transforme le PAN en une substance noire thermiquement stable, modifiant sa structure chimique et physique. La carbonisation qui suit se déroule sous azote, éliminant environ 50 % de la masse du PAN et produisant une fibre dite "haute résistance" avec des caractéristiques mécaniques liées à la densité des liaisons. La graphitisation ultérieure, effectuée à des températures de 2 000 à 3 000 °C sous gaz inerte, améliore la structure cristalline de la fibre, augmentant sa compacité et sa densité. Les traitements de surface sont ensuite appliqués pour améliorer l'adhérence de la fibre à la matrice polymérique, tandis que l'ensimage est utilisé pour lier les monofilaments et améliorer la résistance au frottement. Les fibres de carbone ainsi traitées offrent des propriétés mécaniques et chimiques adaptées à différents types de composites (Ronan Mathieu, 2020).

En ajustant les paramètres de fabrication tels que la température et le temps, il est possible d'obtenir des fibres de carbone avec des propriétés variées telles qu'un module d'élasticité élevé ou intermédiaire et une haute résistance à la traction. En fait, les principales caractéristiques des fibres de carbone sont les suivantes :

- Une grande résistance à la traction et à la compression,
- Un module d'élasticité élevé pour une rigidité accrue,

- Une faible densité et une excellente résistance chimique,
- Une bonne tenue à la chaleur,
- Une bonne conductivité électrique (Gernitex, s. d.).

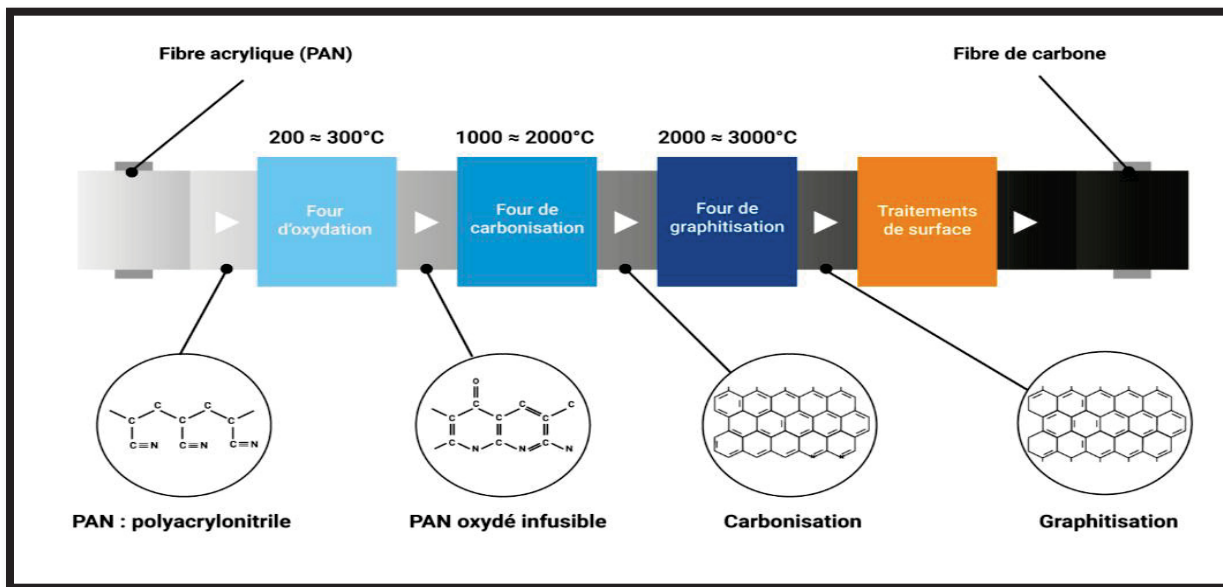


Figure 1.4 Principe du procédé de fabrication des fibres de carbone ex-PAN (Toray, s. d.)

1.7 Nature des fibres de carbone employées dans la fabrication des composites

Les fibres de carbone utilisées pour la fabrication des composites peuvent se présenter différemment selon la forme et la dimension du matériau souhaité telle que montré sur la figure 1.5. Les fibres de carbone peuvent ainsi être :

- Utilisées directement à partir d'une bobine (pour un enroulement filamentaire par exemple),
- Tressées sous forme de nappes de tissu sec : les fibres sont arrangées suivant des axes qui assurent au composite les propriétés requises. Il en résulte une architecture fibreuse appelée aussi « préforme », correspondant à des nappes unies ou pluridirectionnelles et selon plusieurs dimensions (2D, 3D, etc.),
- Coupées ou broyées avant inclusion dans la matrice.

Pour certaines applications, les nappes de tissus sont commercialisées déjà prés imprégnés avec une résine (Comité d'experts spécialisés et al., 2010).

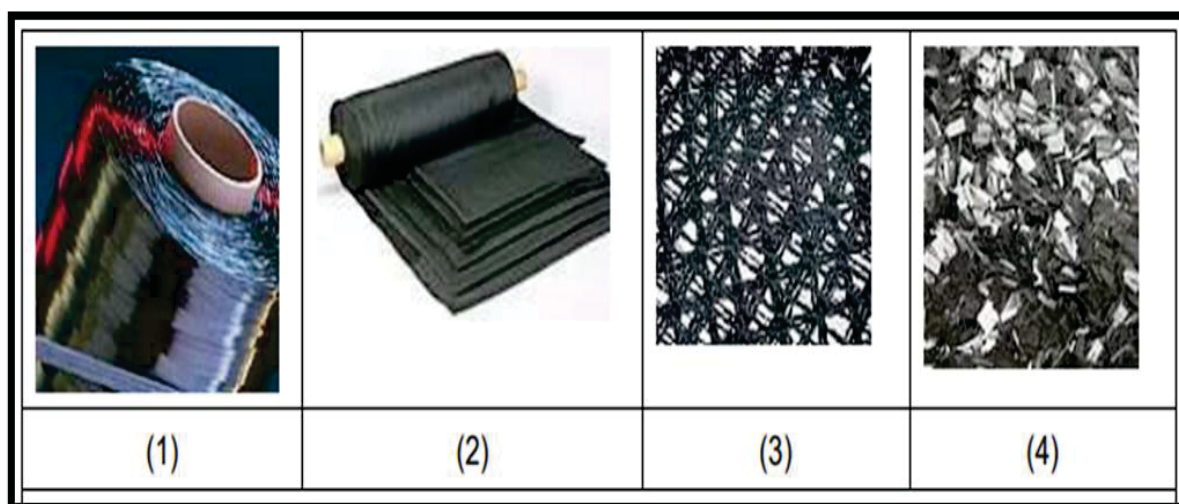


Figure 1.5 (1) Bobine (2) Nappes de tissu sec (3) Nappes unies (4) fibres coupées et broyées (Comité d'experts spécialisés et al., 2010)

1.8 Les additifs utilisés dans les matériaux composites à fibres de carbone

Les composites à fibres de carbone intègrent souvent des additifs pour améliorer leurs performances et adapter leurs propriétés aux besoins industriels. Parmi eux, les agents de couplage occupent une place essentielle. Le polyéthylène maléaté (MAPE) en est un exemple. Il renforce l'adhésion entre les fibres et la matrice polymère. Cette meilleure cohésion à l'interface facilite la transmission des contraintes et réduit le risque de délaminage. Le résultat est une robustesse mécanique accrue pour l'ensemble du composite (LE GENTIL, 2023). Les agents mouillants sont indispensables. Ils assurent une dispersion homogène des fibres de carbone dans la matrice. En facilitant la pénétration de la résine et l'enrobage des fibres, ils réduisent leur agglomération. Cette répartition uniforme donne au matériau des propriétés mécaniques régulières et maximales. Elle renforce aussi sa fiabilité et sa durabilité. À côté de ces additifs, d'autres jouent un rôle de renfort. À côté des agents mouillants, certains additifs agissent comme renforts. On cite les nanotubes de carbone, les nanoparticules de silice, les nano-argiles et le graphène. Intégrés dans la matrice à l'échelle nanométrique, ils accroissent

la résistance et augmentent la rigidité. Dans plusieurs cas, ils améliorent aussi la conductivité, qu'elle soit électrique ou thermique. Le graphène se distingue particulièrement : il élève nettement la performance mécanique, tout en apportant une grande stabilité thermique et une meilleure résistance à l'usure (Pramodkumar & Budhe, 2024). Les agents de remplissage, comme les charges minérales à base de silice, sont intégrés pour améliorer les propriétés thermiques et la stabilité dimensionnelle du composite (X. Zhang et al., 2017).

Ces charges limitent la dilatation thermique. Elles renforcent la résistance à la chaleur et limitent les déformations ou retraits causés par de fortes variations thermiques. Ces effets prolongent la durée de vie des pièces et autorisent leur usage dans des environnements exigeants (Le Gentil, 2023). L'action des additifs sur la conductivité thermique dépend, elle, de leur concentration et de leur répartition dans la matrice. En somme, les additifs modifient profondément les propriétés des composites à fibres de carbone et conditionnent leurs performances dans de nombreuses applications.

1.9 Usinage des matériaux composites à fibres de carbone

Lors de l'assemblage des structures composites, des opérations de finition sont souvent nécessaires. Elles consistent à enlever la matière avec des outils coupants. L'usinage des CFRP diffère fortement de celui des métaux. Les fibres de carbone sont abrasives et les structures composites hétérogènes. Ces particularités entraînent des dommages possibles : rupture de la matrice, arrachement des fibres, délaminage. Pour limiter ces problèmes, les procédés doivent être adaptés. Les procédés d'usinage les plus utilisés sont le perçage et le fraisage, adaptés au contournage ou au détournage. S'y ajoutent des techniques non conventionnelles, comme la découpe au jet d'eau haute pression ou la découpe laser. À la différence des alliages métalliques, les composites CFRP sont plus difficiles à usiner. Leur hétérogénéité et l'abrasivité des fibres compliquent fortement l'opération. L'usinage de ces matériaux reste donc un véritable défi pour les industriels et les chercheurs. De nombreuses études se sont attachées à évaluer l'effet des paramètres de coupe sur des composites renforcés par des fibres de carbone, de verre ou d'aramide (Ze et al., 2023).

1.10 Caractéristiques des procédés d'usinage des composites

Pour faire face à la variété des applications industrielles, de nombreux procédés d'usinage particuliers ont émergé, combinant techniques classiques et innovations technologiques. Ces méthodes sont illustrées dans la figure 1.6, allant de l'usinage traditionnel à des techniques innovantes comme le jet d'eau ou le laser, visant à maintenir l'intégrité des composites tout en garantissant la qualité et la précision des pièces finales. L'analyse et l'amélioration de ces techniques constituent donc un défi clé pour exploiter au mieux les performances des matériaux composites.

Tableau 1 – Comparaison des procédés d'usinage pour composites			
Paramètres	Usinage par outil classique	Usinage par jet d'eau	Usinage par laser
Possibilités	Toutes	Découpe et perçage traversant	Découpe et perçage traversant
Thermique	Échauffement possible	Pas d'échauffement	Dégradation thermique
Résidu	Copeaux et poussières	Poussières emportées par l'eau	Pas de résidus (matière vaporisée)
Fixation	Solide	Légère	Légère
Usure	L'outil	La buse (10 à 200 h)	
Épaisseur	Limitée par la géométrie de l'outil et la puissance de la machine	Limitée par la divergence et la perte de puissance du jet	Limitée par la puissance du rayon et la dégradation thermique du matériau
Machines	Toute une gamme, de l'outil portable manuel à la machine-outil à commande numérique	Compresseur hydraulique et table de découpe avec portique	Générateur laser dans un local clos
Réglages	Puissance de la machine Outil (matériau, géométrie) Avance Vitesse de coupe	Nature du fluide (eau, abrasifs) Diamètre de la buse Pression Distance d'attaque Vitesse de déplacement	Puissance du rayon laser Vitesse de déplacement Gaz d'appoint
Alimentation	Énergie électrique	Pompe HP (énergie électrique, air comprimé) et eau	Énergie électrique, fluide de refroidissement du générateur, gaz d'assistance éventuel
Hygiène et sécurité	Bruit et utilisation de machine (outil classique)	Bruit de groupe hydraulique, sécurité de pompes haute pression	Danger du rayon, gaz toxique, risque d'incendie, réglementation très stricte
Maintenance	Machine-outil (électricité, entretien, graissage...)	Maintenance électrique et hydraulique (pompe, joint...)	Maintenance très spécialisée du générateur laser

Figure 1.6 Différents types d'usinages (DESSARTHE, 1997)

L'usinage des composites reste difficile. Leur anisotropie, leur abrasivité et leur faible conductivité thermique accentuent l'usure rapide des outils, élèvent la température et provoquent des défauts comme le délaminage ou la mauvaise qualité de surface (Slamani & Chatelain, 2023). Les procédés classiques perçage, détournage avec fraises carbure ou diamantées offrent une bonne précision dimensionnelle. Mais ils demandent un contrôle strict des paramètres de coupe afin de limiter les efforts, l'usure et les dégradations (Slamani et al., 2015). Les recherches montrent que la vitesse d'avance influence surtout les forces et la rugosité. La vitesse de coupe, moins déterminante, stabilise néanmoins l'usinage à grande vitesse (Slamani & Chatelain, 2020). Avec l'évolution des techniques, de nouvelles solutions apparaissent : jet d'eau abrasif, laser. Contrairement aux outils coupants, elles suppriment les contraintes mécaniques directes.

Le jet d'eau diminue les efforts et limite le délaminage. Il garantit aussi une coupe nette. Le laser, rapide et précis, rend possible la fabrication de formes complexes. Mais il reste contraignant : il génère des effets thermiques et crée des zones altérées par la chaleur (Slamani & Chatelain, 2023). Ainsi, qu'il s'agisse d'usinage conventionnel ou non conventionnel, les recherches convergent vers la recherche d'un compromis entre intégrité structurale, qualité de surface et précision dimensionnelle, tout en visant à réduire l'usure des outils et à accroître la productivité des procédés (Slamani et al., 2016).

1.11 Le perçage des matériaux composites

Le perçage est couramment employé dans l'usinage des matériaux composites pour produire les trous requis pour l'assemblage par rivetage des structures composites. L'instrument employé, désigné comme foret hélicoïdal, se distingue par des caractéristiques telles que le diamètre, l'angle de pointe et l'angle de dépouille. La figure 1.7 montre un diagramme précis d'une mèche de forage avec ses diverses propriétés.

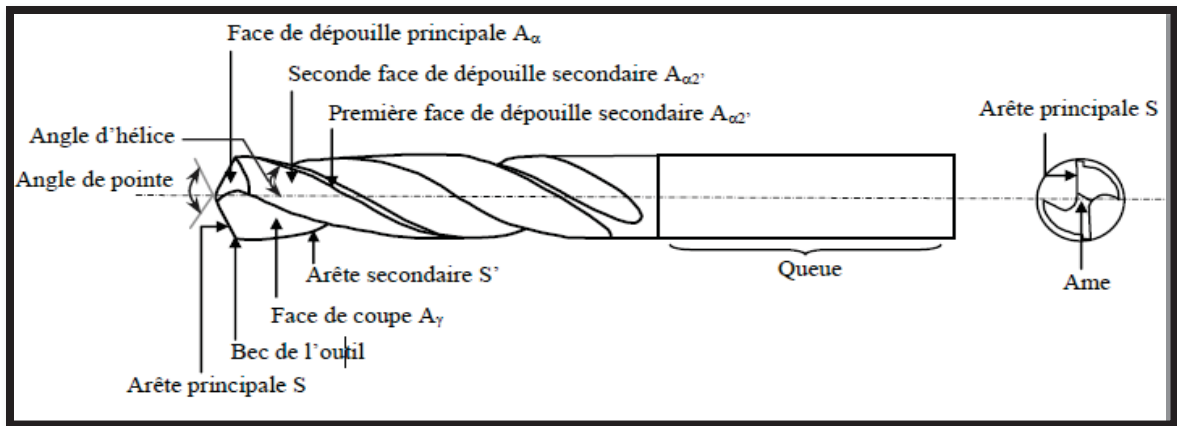


Figure 1.7 Arêtes et surfaces de la partie active d'un foret de perçage (Zenia, 2017)

L'étude des outils de perçage pour les composites à fibres de carbone se concentre sur divers types d'outils, chacun ayant des caractéristiques spécifiques pour des performances optimales. Le choix des matériaux des forets, leur durabilité et leur capacité à prévenir l'abrasion sont essentiels. Les forets diamantés sont très prisés pour leur dureté exceptionnelle et leur précision, offrant une longue durée de vie et une haute résistance à l'usure, ce qui les rend idéaux pour des applications industrielles exigeantes.

Les revêtements à haute dureté sont réalisés par dépôt en phase vapeur chimique (CVD). Cette technique consiste à appliquer une fine couche de diamant, généralement de l'ordre de 15 μm , ou d'un matériau extrêmement dur et résistant à l'usure. Le procédé repose sur le chauffage de l'outil à l'intérieur d'un réacteur contenant de l'hydrogène (H_2) et/ou du méthane (CH_4), à pression atmosphérique (Santhanam & Quinto, 1994).

Lors des opérations de perçage, contrairement au fraisage, l'arête de coupe est en contact permanent avec le matériau, ce qui réduit le risque d'écaillage ou de fracture. De ce fait, grâce à leur dureté et leur tranchant, les forets diamantés CVD sont plus performants pour minimiser le délaminage à la sortie du trou (Zhang et al., 2013). Il s'agit d'une préoccupation majeure pour le perçage de composites dans des pièces de haute technicité, comme dans l'aéronautique. Lorsque le délaminage est le critère de défaillance, les forets CVD (figure 1.8) surpassent indéniablement les forets PCD. Cependant, lorsque le diamètre du trou est le critère de défaillance, le foret PCD survit plus longtemps que les forets CVD et cela s'explique par le fait que le diamant CVD est un revêtement. Lorsqu'il se délamine du carbure de tungstène, l'usure

de l'arête s'accélère rapidement. Un autre avantage du foret diamanté CVD réside dans sa flexibilité de conception, contrairement au foret à wafer standard, où le segment PCD dicte la géométrie. En revanche, sur un foret PCD Fullnib, il n'y a aucune limitation de géométrie et la flexibilité de conception est la même que pour un foret diamanté CVD, à condition que la hauteur de la pointe PCD (qui est limitée) n'entraîne pas d'autres limitations (TELECON, s. d.).



Figure 1.8 outil de perçage CVD (TELECON, s. d.)

1.12 Les caractéristiques des forets et leurs influences sur le perçage

La géométrie de l'outil de perçage joue un rôle déterminant dans la performance du processus, affectant tant les forces de coupe que les risques de dommages sur la pièce et l'usure de l'outil lui-même. Parmi les paramètres géométriques, l'angle de pointe du foret est particulièrement capital lors de l'usinage des composites à fibres de carbone. En effet, cet angle conditionne la façon dont le foret attaque et traverse le matériau, influençant directement la précision et l'intégrité des trous obtenus. Un angle de pointe inadapté peut entraîner plusieurs effets négatifs: intensification du frottement entre l'outil et le composite, élévation excessive de la température lors de l'opération, et accélération de l'usure du tranchant. Ces phénomènes compromettent la qualité finale et la productivité du perçage. Pour obtenir des résultats optimaux, il est donc indispensable de sélectionner un angle de pointe adéquat, en tenant compte des propriétés spécifiques du composite à fibres de carbone, ainsi que des conditions opératoires telles que la vitesse et l'avancement. Ce choix réfléchi permet de réduire les efforts de coupe, de prolonger la durée de vie de l'outil et de garantir un état de surface et une qualité de trou irréprochables dans ces matériaux exigeants (Bolat et al., 2023).

De plus, la figure 1.9 illustre les paramètres de coupe lors d'un processus d'usinage, telles que la vitesse de coupe (V_c) et la vitesse d'avance (V_f), jouant un rôle crucial dans le processus de

perçage. Ces paramètres sont déterminés en fonction de la vitesse de rotation de l'outil (N), du diamètre de l'outil (d), de l'avance de l'outil (f) et du nombre de dents de l'outil (Z).

$$V_c = \frac{\pi N d}{100} \quad (1.1)$$

$$V_f = f Z N \quad (1.2)$$

Avec N, la vitesse de rotation de l'outil (tr/min), d, le diamètre de l'outil (mm), f, l'avance de l'outil dans le matériau (mm/tr/dent) et Z, le nombre de dents de l'outil.

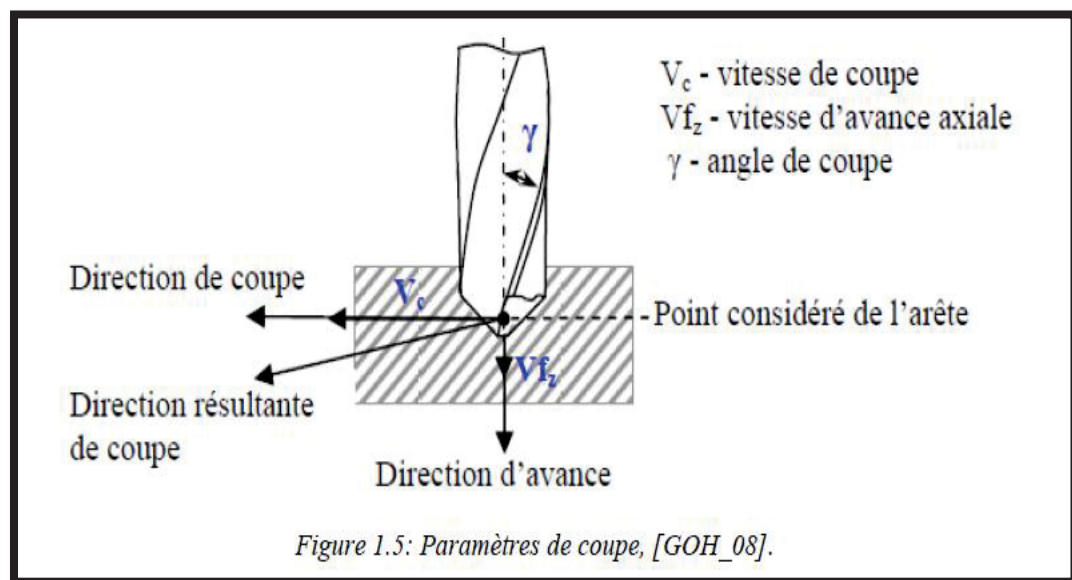


Figure 1.9 Critère de qualité pour une opération de perçage (Gohorianu, 2008)

1.13 Analyse du processus de formation des copeaux en usinage des composites

Pendant l'usinage, les matériaux métalliques produisent des copeaux par déformation plastique, tandis que dans les composites CFRP, cela résulte de la compression et de la rupture des fibres. Lors de l'usinage des matériaux composites, en particulier ceux renforcés de fibres, les recherches ont montré que la formation des copeaux est influencée par l'orientation des fibres

par rapport à l'outil de coupe comme montré sur la figure 1.10. Ce processus diffère considérablement de l'usinage des métaux en raison de l'hétérogénéité et de l'anisotropie des composites. Wang ainsi que Zitoune (D. H. Wang et al., 1995; Zitoune et al., 2005) présentent dans leurs travaux quatre mécanismes de formation des copeaux variant selon l'angle des fibres :

- Pour des fibres alignées à 0° , le copeau résulte d'une série de ruptures, initiées par la décohésion fibre/matrice et suivie par la rupture des fibres dans une direction perpendiculaire à l'avancement de l'outil,
- Avec une orientation des fibres positive jusqu'à 75° , la formation des copeaux implique deux ruptures : la compression dû au cisaillement perpendiculaire à l'axe de la fibre, puis une rupture secondaire le long de l'interface fibre/matrice jusqu'à la surface libre,
- Une orientation des fibres de 90° entraîne également deux ruptures : l'arrachement des fibres sous l'outil, suivi par la décohésion fibre/matrice due aux contraintes de cisaillement, aboutissant à la formation du copeau,
- Pour une orientation des fibres de -45° , la rupture primaire le long de l'interface fibre/matrice vers l'intérieur de la pièce est suivie d'une rupture secondaire vers la surface libre lorsque les fibres fléchissent sous l'outil, conduisant à la formation complète du copeau.

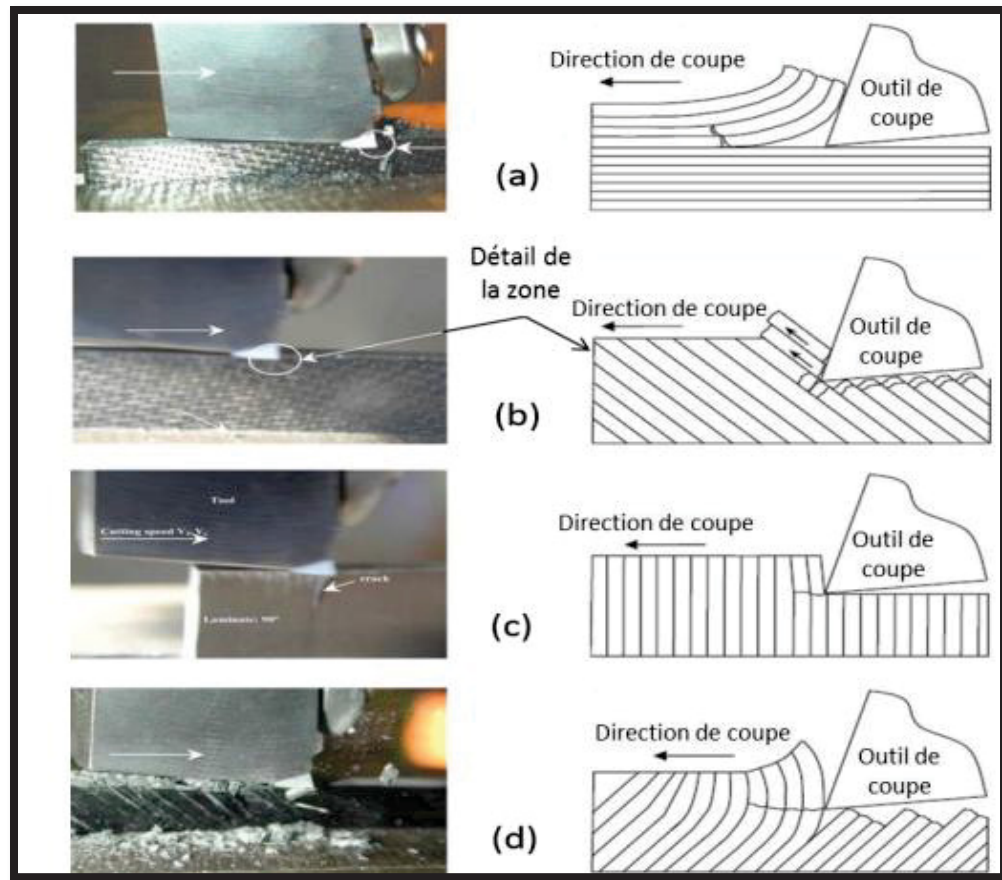


Figure 1.10 Étude expérimentale de la formation de copeaux pour : (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = +45^\circ$, (c) $\theta = +90^\circ$, (d) $\theta = -45^\circ$ Zitoune et al. (Zitoune et al., 2005) à gauche et Wang et al. (D. H. Wang et al., 1995) à droite

1.13.1 Effet de l'angle de coupe sur le processus de formation du copeau

L'angle de coupe joue un rôle déterminant dans la formation des copeaux lors de l'usinage des composites à fibres de carbone (CFRP) tel que montré sur la figure 1.11. Cet angle, qui représente l'angle entre la surface de la pièce et la direction de l'avancement de l'outil, affecte directement la qualité du perçage, la morphologie des copeaux et la durabilité de l'outil.

Des recherches récentes ont montré que l'optimisation de l'angle de coupe peut réduire la délamination, minimiser l'usure de l'outil et améliorer la qualité de surface des trous percés.

Par exemple, un angle de coupe plus faible peut réduire les forces de cisaillement et minimiser les dommages aux fibres et à la matrice.

À l'inverse, un angle de coupe plus élevé peut augmenter la résistance à l'usure de l'outil mais peut aussi entraîner une plus grande délamination. L'équilibre entre ces facteurs est crucial pour obtenir des résultats optimaux en termes de qualité et d'efficacité de l'usinage (Ze et al., 2023).

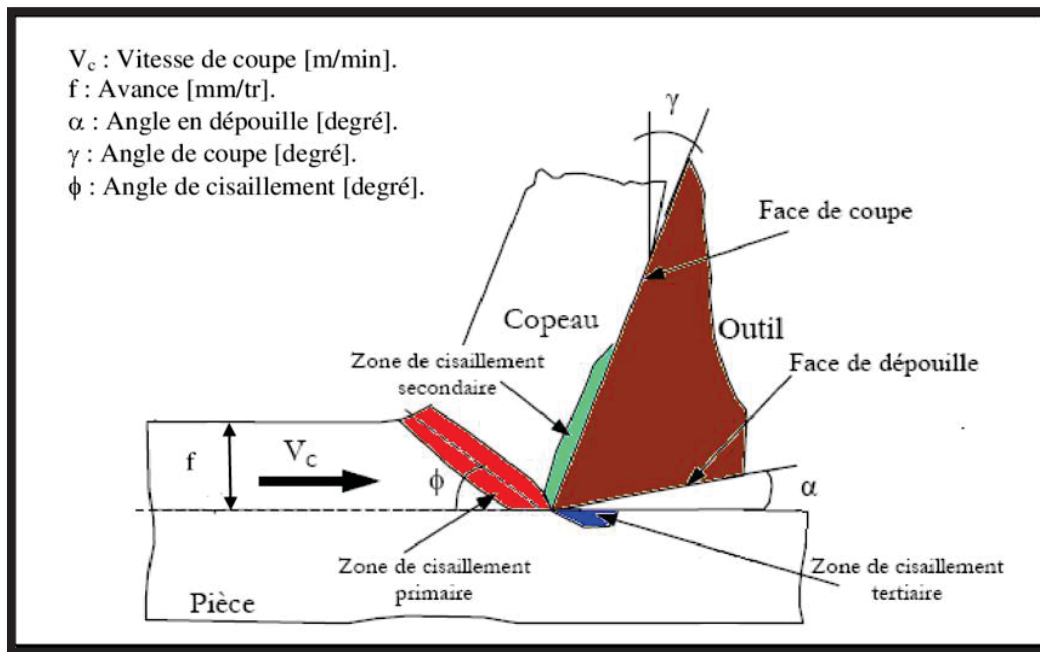


Figure 1.11 Mécanisme de formation de copeaux (Fluids and Lubricants, 2022)

En résumé, l'utilisation d'outils avec des angles de coupe positifs facilite la formation et le dégagement des copeaux par rapport à ceux avec des angles de coupe négatifs. De plus, les outils à angles positifs génèrent moins d'efforts de coupe et d'usure que ceux à angles négatifs. En coupant perpendiculairement aux fibres avec des angles de coupe positifs, les copeaux sont formés par la section des fibres, tandis que des angles nuls ou négatifs entraînent une formation de copeaux par macro-fissuration due au flambement des fibres.

1.13.2 Efforts de coupe en usinage des composites

Les efforts de coupe en usinage se caractérisent par deux composantes principales : les forces de coupe (F_c) et les forces d'avance (F_h). Ces chercheurs ont observé que ces forces varient significativement en raison de la structure hétérogène des CFRP, générant des vibrations lors de la formation des copeaux. (Geier & Szalay, 2017) ont montré que l'orientation des fibres influence fortement ces variations, comme illustré à la figure 1.12. Les efforts sont généralement plus faibles pour des fibres alignées à 0° par rapport à la direction de coupe, et plus élevés pour une orientation à 90° . Haddad et al (Haddad et al., 2015) ont souligné que ces différences s'expliquent par les mécanismes de formation des copeaux spécifiques à chaque orientation. Par exemple, pour les fibres à 0° , le mécanisme dominant est le pelage et la flexion de la surface de coupe, tandis qu'à 90° , les fibres ont tendance à se plier avant d'être coupées, nécessitant une force plus importante. Ghafarizadeh et al. (Ghafarizadeh et al., 2016) ont noté que les forces d'avance sont principalement attribuées au retour élastique du matériau après compression par l'outil en fraisage. Ces études récentes soulignent l'importance d'optimiser les paramètres de coupe en fonction de l'orientation des fibres pour minimiser les efforts et améliorer la qualité de l'usinage des composites à fibres de carbone.

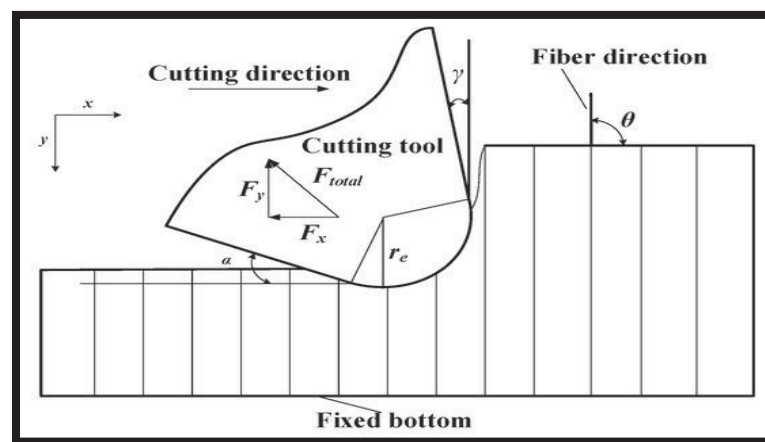


Figure 1.12 Schéma de l'angle de coupe de la fibre (Ning et al., 2022)

1.13.2.1 Effet de l'angle de coupe sur les efforts d'usinage

Des études récentes ont confirmé que l'augmentation de l'angle de coupe entraîne généralement une diminution des forces de coupe (F_c) lors de l'usinage des composites unidirectionnels CFRP. Selon Mathieu (Mathieu, 2020), cette tendance s'explique par la facilitation de la formation et du dégagement des copeaux avec des angles de coupe positifs, contrairement aux angles négatifs.

Les outils avec des angles de coupe positifs génèrent des forces de coupe moindres, ce qui se traduit par une usure d'outil réduite par rapport aux angles négatifs. Ghafarizadeh et al. (Ghafarizadeh et al., 2016) ont confirmé que l'augmentation de l'angle de coupe réduit généralement les forces d'usinage dans les composites CFRP. Leurs expériences ont montré une diminution des forces de coupe allant jusqu'à 20% lorsque l'angle de coupe passait de 0° à 10° . Cependant, ils ont également noté que cette relation n'est pas toujours linéaire et peut varier selon les conditions de coupe spécifiques. Xu et al (Xu et al., 2019) ont exploré plus en détail l'interaction entre l'angle de coupe et l'orientation des fibres. Ils ont observé que l'effet de l'angle de coupe sur les forces d'usinage était plus prononcé pour certaines orientations de fibres, notamment à 0° et 90° , par rapport à la direction de coupe. Pour les fibres orientées à 45° , l'influence de l'angle de coupe était moins significative.

Haddad et al. (Haddad et al., 2015) ont apporté une perspective supplémentaire en examinant l'effet de l'angle de coupe sur l'intégrité de surface des composites usinés. Leurs résultats ont montré que des angles de coupe plus élevés peuvent réduire les dommages surfaciques, mais cet effet est fortement dépendant de l'orientation des fibres. Cette interaction complexe entre l'angle de coupe et l'orientation des fibres souligne l'importance d'une approche holistique dans l'optimisation des paramètres d'usinage pour les composites CFRP, visant à minimiser les efforts de coupe tout en préservant l'intégrité du matériau.

La Figure 1.13 montre que l'influence de l'angle de coupe sur les forces d'avance est moins significative. En conclusion, une coupe perpendiculaire aux fibres avec des angles de coupe positifs entraîne la coupe des fibres pour former le copeau, tandis que des angles nuls ou négatifs génèrent des copeaux par macro-fissuration due au flambement des fibres.

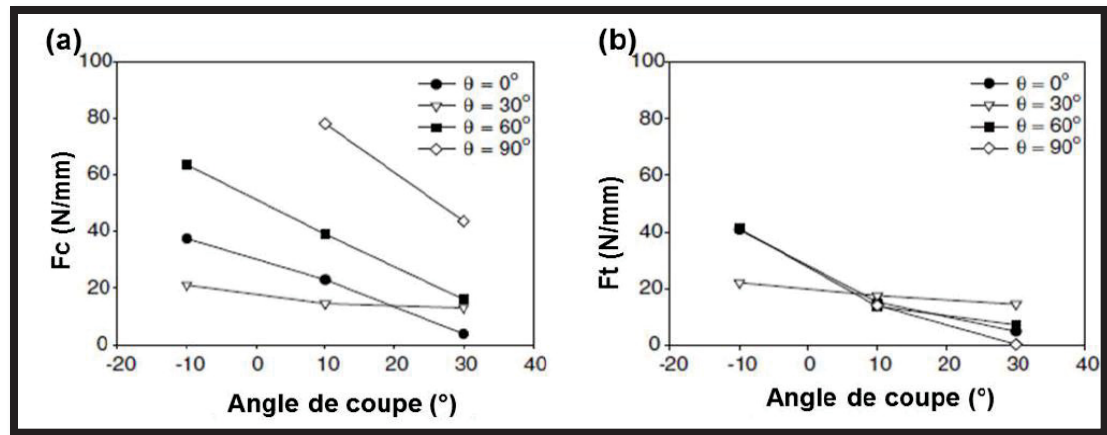


Figure 1.13 Effet de l'angle de coupe sur (a) les efforts de coupe et (b) les efforts d'avance (Kaneeda, 1991)

1.13.2.2 Effet de l'angle de dépouille sur les forces d'avance F_t

Selon Zenia et al. (Zenia et al., 2015), l'angle de dépouille joue un rôle crucial dans le processus d'usinage des composites, principalement en raison de son influence sur le phénomène de retour élastique des fibres. Leur étude a montré que l'augmentation de l'angle de dépouille tend à réduire les forces d'avance, corroborant l'idée qu'un angle de dépouille plus faible favorise le brossage des fibres sur la surface de dépouille, entraînant une augmentation des forces d'avance. Des résultats indiquent qu'une optimisation de ces paramètres est nécessaire pour minimiser les forces d'avance et améliorer la qualité de surface.

Cao et al. (Cao et al., 2019) ont démontré que l'optimisation de l'angle de dépouille peut réduire significativement les forces d'avance, améliorant ainsi la qualité de surface et prolongeant la durée de vie de l'outil. En effet, un angle de dépouille optimal permet de minimiser la délamination et la formation de fibres arrachées, ce qui est crucial pour maintenir l'intégrité structurelle des composites. Par conséquent, l'ajustement de cet angle est une stratégie clé pour optimiser le processus d'usinage des matériaux composites à fibres de carbone.

1.14 Les défauts produits lors de l'usinage des matériaux composites

1.14.1 Délaminage du composite

Dans un stratifié composite en CFRP, les différentes couches peuvent se désolidariser lorsqu'elles subissent des efforts de coupe défavorables. Ce phénomène, connu sous le nom de délaminage, constitue un défaut majeur car il altère significativement les propriétés mécaniques des pièces usinées. Sa maîtrise est donc un enjeu essentiel, particulièrement dans les secteurs où la performance structurelle est critique.

De nombreux travaux de recherche (Geier & Szalay, 2017; Karpat & Bahtiyar, 2015; Melentiev et al., 2016) ont étudié l'influence des paramètres du procédé de perçage sur l'amplitude de ce défaut. Cependant, certaines méthodes de mesure ou solutions d'évaluation restent difficiles à mettre en œuvre en contexte industriel. Le délaminage peut être décrit par différents ensembles de variables, souvent basés sur un ou plusieurs paramètres dimensionnels (Lissek et al., 2016). Malgré cela, le facteur de délaminage conventionnel ($F_d = D_{max} / D_{nom}$) demeure l'indicateur le plus couramment utilisé pour l'évaluation et l'optimisation de la qualité d'usinage en perçage (figure 1.15).

Lors du perçage des stratifiés FRP, deux formes principales de délaminage apparaissent :

- Arrachement de fibres « peeling » à l'entrée du trou,
- Fibres non coupées à la sortie.

Ce facteur peut être évalué par :

- L'analyse d'images numériques de trous percés,
- Le contrôle par C-scan,
- La méthode de meulage (polissage couche par couche) (H. Wang et al., 2014),

Davim et Reis, à travers des essais réalisés avec des forets brad & spur et à tige droite, ont observé que le facteur de délaminage varie avec la géométrie de l'outil et les conditions de coupe. Les défauts les plus fréquents incluent le délaminage (en entrée et/ou en sortie), l'arrachement des fibres, les fibres non coupées et la fissuration de la matrice. Parmi ceux-ci, le délaminage illustré à la figure 1.14 est particulièrement critique (Davim & Reis, 2003).

Les observations montrent que le délaminage en sortie de trou est généralement plus problématique qu'à l'entrée. Ce phénomène s'explique par la combinaison de l'effort de poussée, de la vitesse d'avance, de la géométrie de l'outil et de son état d'usure (Feito et al., 2018). Il se produit souvent à l'interface des deux dernières couches du stratifié, où les contraintes induites par l'avancement du foret provoquent une déformation importante. Lorsque la force exercée dépasse la résistance à la cohésion de la matrice, la séparation des couches débute.

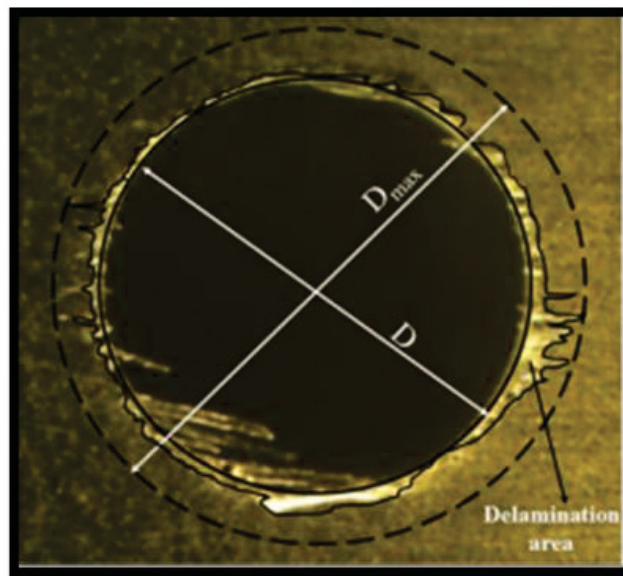


Figure 1.14 Quantification du facteur de délaminage à partir de la surface d'une image microscopique (John & Kumaran, 2020)

1.14.2 Rugosité de surface

La rugosité de surface du CFRP dépend des paramètres de coupe, de l'état et de la géométrie de l'outil, ainsi que de l'anisotropie du matériau. Des conditions inadaptées ou l'usure de l'outil peuvent provoquer des stries, des arrachements de fibres et des brûlures. La résine, sensible à la chaleur, peut se déformer ou se fissurer, générant des microcavités qui aggravent la rugosité. Les travaux de Gao et coll (Gao et al., 2016) montrent que l'angle de coupe des fibres est le facteur le plus influent sur la rugosité, suivi de la vitesse de coupe, de la profondeur de passe et de l'angle d'attaque. Poulachon et al. (Poulachon et al., 2016) ont observé une forte dégradation de surface pour des angles autour de $135^\circ \pm 18^\circ$, favorisant la présence de fibres longues non coupées. Ces résultats permettent d'intégrer, dans l'évaluation de la rugosité, des critères liés à la proportion et à la longueur des fibres résiduelles (Gao et al., 2016).

Enfin, la rugosité tend à augmenter avec le nombre de trous percés tel que montré sur la figure 1.15. Dans ce cas, la longueur totale usinée de 42 mm (≈ 10 trous) provoque l'émoussement de l'arête de coupe qui réduit la capacité de coupe et mène à des fibres arrachées ou non coupées. La poursuite du perçage entre 42 et 58,8 mm (10 à 14 trous) mène à une augmentation nette de l'usure de la dépouille, ce qui accroît les efforts tangentiels et le couple de perçage et mène à des fissures dans la matrice dégradant fortement l'état de surface (F. Wang et al., 2017).

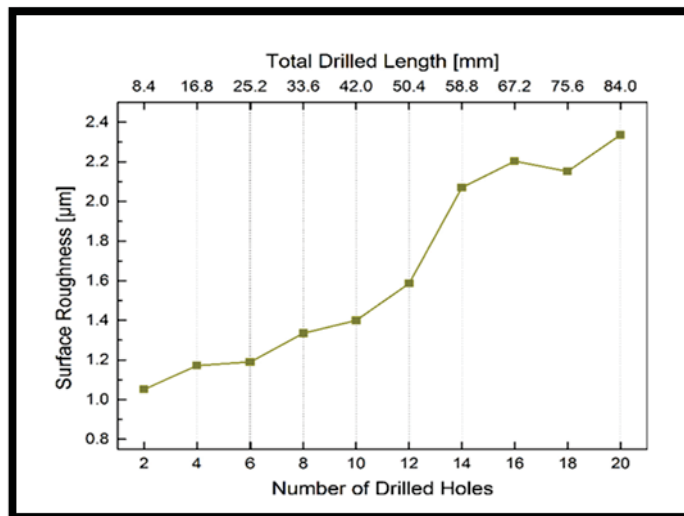


Figure 1.15 Variation de la rugosité de surface selon le nombre de trous percés et de la longueur totale de perçage (F. Wang et al., 2017)

1.14.3 Délaminage de type II ou III (bourrelet/ fibres non coupées)

Dans l'usinage des composites CFRP, on appelle bourrelet un excès localisé de matériau mesurable sur la pièce finie. Ce défaut est désigné différemment selon les auteurs : certains parlent de « délaminage de type II ou III » (Navarro-Mas et al., 2018), d'autres de fibres non coupées (uncut fibres) (Geier et al., 2019). Les bourrelets apparaissent le plus souvent en haut ou en bas du trou percé (Fig. 1.16) et résultent du pliage des couches de fibres, ce qui leur donne un aspect similaire à celui de fibres non sectionnées.

Des essais comparatifs de Xu et al utilisant différents outils (foret dagger, foret brad & spur , foret hélicoïdal standard) ont démontré que la vitesse d'avance est le facteur le plus déterminant dans l'apparition de ces défauts, et que le foret brad & spur offre les meilleurs résultats pour les réduire. Qiu et coll. ont limité la présence de fibres non coupées en optimisant le rapport d'étapes d'une foret étagé. (Geier et al., 2019) ont développé un système de surveillance en temps réel par analyse d'images numériques pour détecter ces fibres dans les UD-CFRP, tandis que Hrechuk et al (Hrechuk et al., 2018) ont proposé une méthode d'évaluation complète de la qualité des perçages FRP intégrant à la fois le délaminage et les fibres non coupées (Xu et al., 2013).

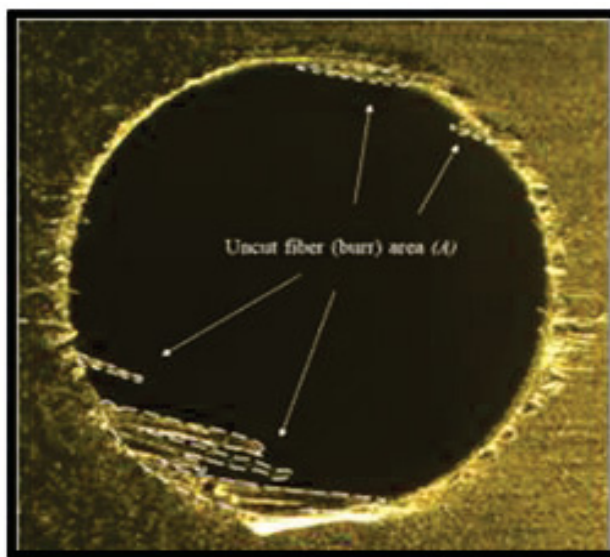


Figure 1.16 Micrographie des fibres non coupées (John & Kumaran, 2020)

1.15 Influence des additifs sur l'usinage

Les additifs sont fréquemment intégrés dans les matériaux composites à fibres de carbone pour améliorer diverses propriétés telles que la résistance, la conductivité électrique, la durabilité et la facilité de mise en œuvre. Le choix des additifs est déterminé par les objectifs spécifiques et les propriétés souhaitées des composites, permettant ainsi d'adapter les matériaux à des besoins technologiques particuliers et facilitant leur application dans divers secteurs industriels. Parmi les additifs couramment utilisés, on trouve des agents de renforcement, des agents de couplage, des agents de traitement de surface, des agents anti-UV, des agents ignifuges et des agents de remplissage, chacun apportant des propriétés distinctes qui influencent les performances finales des composites (LUZI, 2024).

Le graphène, en particulier, se distingue par ses propriétés exceptionnelles. Sa conductivité thermique élevée (environ 5000 W/m.K) améliore la dissipation de la chaleur générée lors de l'usinage. De plus, le graphène possède une résistance mécanique très élevée, étant 150 fois plus résistant que l'acier, tout en étant extrêmement léger et fin. Sa flexibilité et ses propriétés bactériostatiques en font un additif polyvalent qui peut être incorporé dans les composites de différentes manières, telles que dans le fil directement, dans une membrane imperméable, ou sous forme d'imprimés (Navigation principale & CNRS Physique, 2023).

La cire, quant à elle, offre des propriétés lubrifiantes qui réduisent le frottement lors du perçage et aide à l'évacuation des copeaux. Elle forme également une couche protectrice sur la surface du matériau. L'utilisation combinée du graphène et de la cire dans les composites à fibres de carbone pourrait améliorer significativement le processus de perçage en réduisant la génération de chaleur et en améliorant sa dissipation, en diminuant le frottement et en facilitant l'évacuation des copeaux, en renforçant la résistance mécanique du matériau et en protégeant la surface du matériau pendant le perçage. Ces propriétés combinées pourraient conduire à une meilleure qualité des trous percés, une réduction de l'usure des outils et une amélioration globale du processus de perçage des composites à fibres de carbone (JAMMEL, 2025).

1.15.1 Influence de l'additif de graphène sur l'usinage des composites

Selon les travaux de Khalid El-Ghaoui (El-Ghaoui et al., 2019), la diminution des forces de coupe lors du détournage de composites à fibres de verre (GFRP) avec additifs de graphène est moins marquée pour les forces normales que pour les forces d'avance telle que montrée sur la figure 1.17. Cette réduction des efforts de coupe facilite le processus d'usinage et améliore la qualité de surface en limitant les dommages. Des conclusions similaires ont été rapportées par (Mathieu, 2020), pour le détournage de composites à fibres de carbone (CFRP), où une augmentation de la teneur en graphène entraîne une baisse notable des forces d'avance (Figure 1.18).

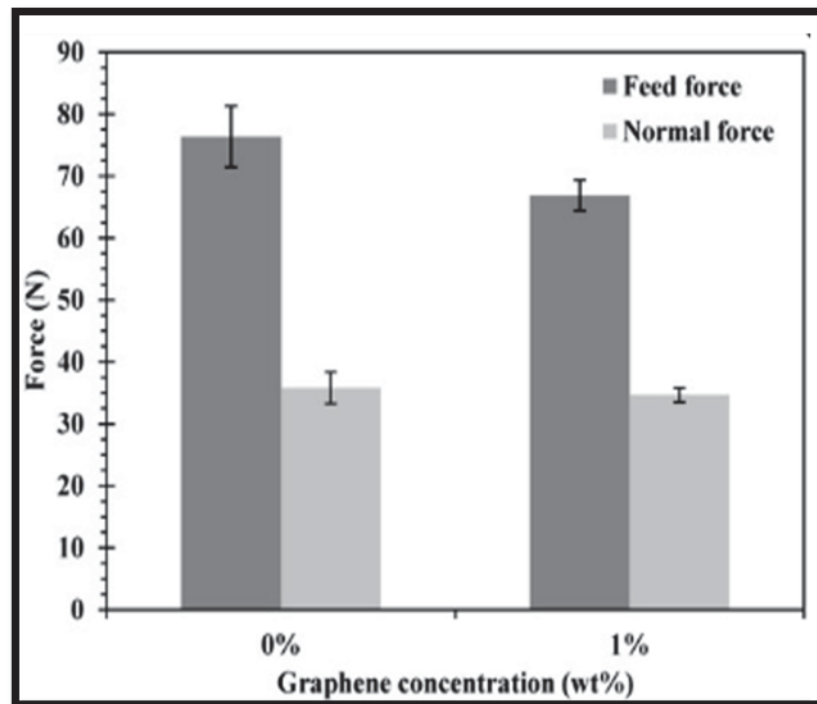


Figure 1.17 Effets de graphène sur la force d'usinage de fibres de carbone (El-Ghaoui et al., 2019)

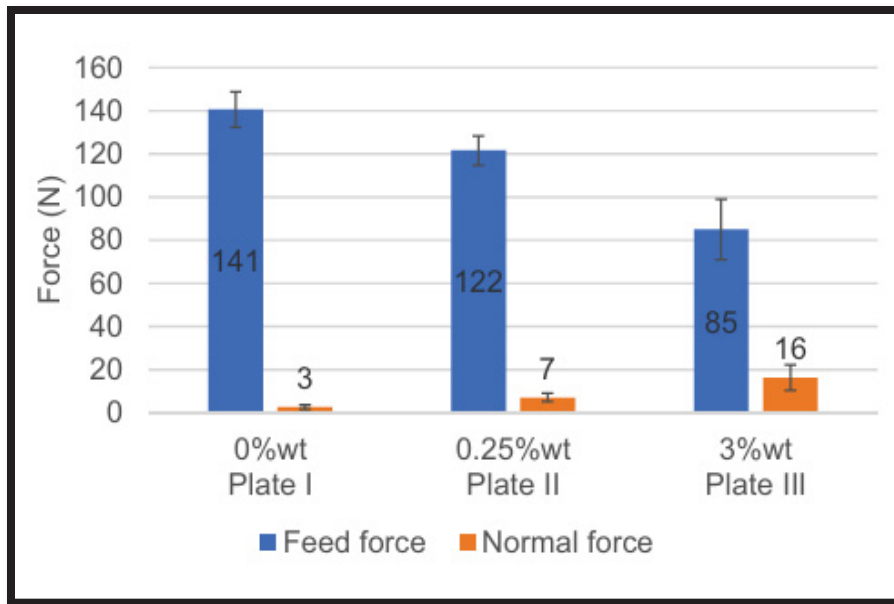


Figure 1.18 Effets de graphène sur la force d'usinage de fibres de carbone
(Mathieu et al., 2022)

Les essais de Khalid El-Ghaoui ont également mis en évidence que l'ajout de 1 % en masse de graphène dans un GFRP réduit la rugosité moyenne (R_a) à $7,3 \mu\text{m}$ comparativement à $8,5 \mu\text{m}$ pour le matériau de référence sans additif (Figure 1.19). Cette amélioration est associée à la diminution des forces de coupe observée, qui rend la séparation des copeaux moins brutale et réduit la profondeur des dommages de surface.

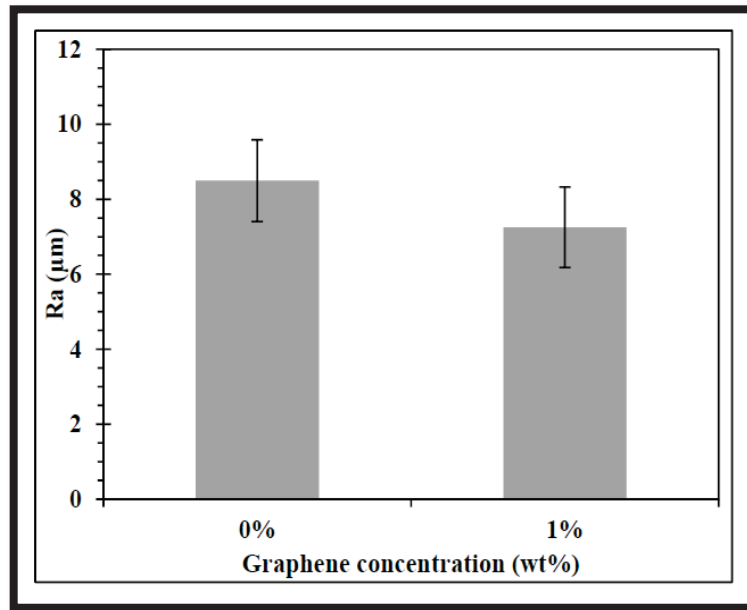


Figure 1.19 Effets du graphène sur la rugosité de surface (El-Ghaoui et al., 2019)

Par ailleurs, plusieurs études ont montré que l'incorporation de graphène accroît la conductivité thermique des polymères. Une conductivité plus élevée favorise la dissipation de la chaleur au sein de la pièce, limitant ainsi l'échauffement de l'outil. Étant donné que le frottement est la principale source de chaleur en usinage, la réduction des forces de coupe entraîne une génération thermique moindre, et donc des températures de coupe plus basses (Figure 1.20).

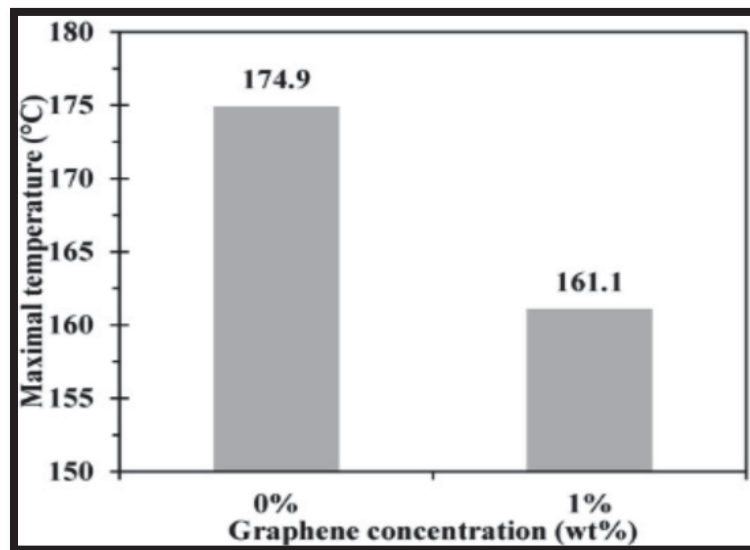


Figure 1.20 Effets du graphène sur la température de coupe (El-Ghaoui et al., 2019)

Enfin, d'autres chercheurs ont montré que l'ajout de graphène a permis de réduire significativement le phénomène de délaminage autour des zones d'entrée et de sortie lors du perçage des stratifiés. (Thakur et al., 2025) démontrent dans leur étude que les composites CFRP contenant 0,25 % en masse de graphène présentent un facteur de délaminage (DF) plus faible en perçage, bien que ce dernier reste plus important à la sortie qu'à l'entrée.

1.15.2 Influence de l'additif de cire sur le perçage des composites

La cire utilisée comme lubrifiant solide dans l'usinage des composites à fibres de verre et de carbone agit principalement en provoquant le frottement à l'interface outil-matière et en dissipant efficacement la chaleur dégagée. Cette action limite les déformations, les risques de délaminage et les dommages thermiques susceptibles d'altérer la microstructure du composite. En comblant les pores du matériau, elle contribue à stabiliser les dimensions, à améliorer la qualité de surface obtenue et à faciliter l'évacuation des copeaux, ce qui prévient leur accumulation et l'apparition de défauts en sortie de perçage.

Les études, dont celle de Slamani et al. (2025), montrent que l'efficacité de la cire dépend fortement de sa concentration et des paramètres d'usinage choisis en perçage (vitesse de coupe, vitesse d'avance). Une combinaison optimale – notamment 1% de cire associée à 0,25% de graphène permet de minimiser les forces de coupe lors du perçage, grâce à une lubrification améliorée qui réduit la friction entre l'outil et le matériau.

Les tests réalisés sur des composites GFRP à différentes teneurs en cire (0%, 1%, 2%) révèlent une réduction nette des forces de coupe pour une concentration de 1% à 2% de cire telle que montré sur la figure 1.21.

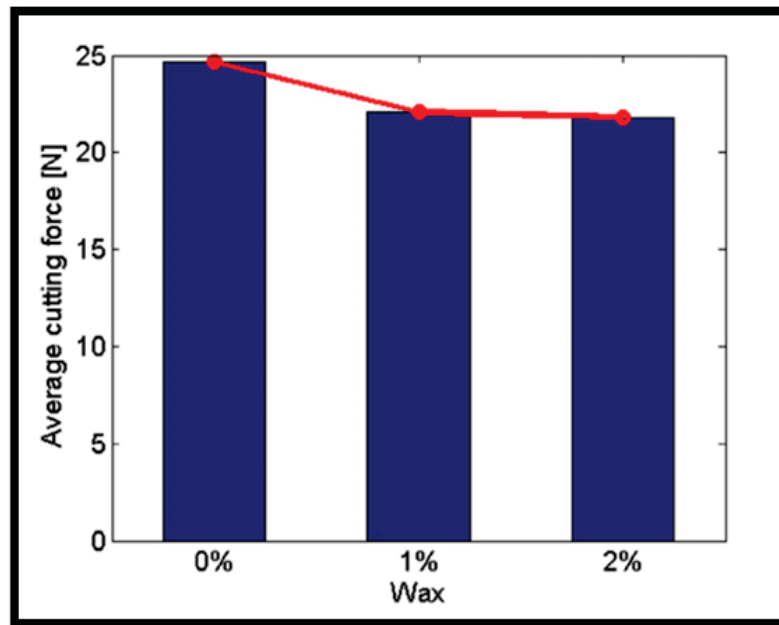


Figure 1.21 Effets de la cire sur la force de perçage des GFRP (Slamani et al., 2025)

Ce résultat est compatible aux travaux de (El-Ghaoui et al., 2019) qui montrent que la proportion de 1 % de cire apparaît comme un compromis optimal, assurant un équilibre entre amélioration de l'usinabilité et maintien des propriétés mécaniques de la pièce.

1.16 Conclusion

Cette revue bibliographique explore les matériaux composites renforcés de fibres de carbone, en se concentrant sur leurs caractéristiques, leur processus de fabrication, leur usinage, ainsi que leur impact sur les propriétés mécaniques. Elle met en lumière l'importance croissante de ces composites dans divers secteurs tels que le sport, l'automobile, l'aérospatiale en raison de leur résistance, de leur rigidité et de leur rapport résistance/poids élevé. De plus, elle examine les différentes méthodes de fabrication des composites à fibres de carbone. En considérant les divers éléments examinés dans la revue de littérature il est important de souligner que :

- Les paramètres qui influencent l'usinage des composites à fibres de carbone comprennent la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de coupe, l'angle de coupe, l'angle de dépouille, le type d'outil de coupe utilisé, la géométrie de l'outil, la

lubrification et le refroidissement, ainsi que les propriétés des matériaux composites eux-mêmes, telles que la nature abrasive des renforts et l'hétérogénéité des structures composites. Ces paramètres doivent être soigneusement ajustés pour éviter ou limiter les dommages tels que la rupture de la matrice, l'arrachement des fibres et le délaminage qui peuvent survenir pendant l'usinage.

- L'ajout des additifs lors de la production des composites a un effet significatif sur les propriétés mécaniques de ces matériaux. En effet ils agissent comme des renforts, améliorant la résistance et la rigidité de la structure composite. Certains additifs renforcent la résistance à la traction du matériau, améliorant ainsi sa capacité à supporter des charges élevées sans se rompre. D'autres augmentent la résistance à la flexion, essentielle pour résister aux forces dans différentes directions, tandis que d'autres améliorent la résistance à l'impact, permettant une meilleure absorption et dissipation de l'énergie des chocs. De plus, les additifs peuvent également impacter de manière significative la conductivité thermique des composites à fibres de carbone. Certains additifs, comme les particules de céramique, peuvent améliorer la conductivité thermique en facilitant la transmission de chaleur à travers la matrice du composite.

1.17 Objectifs de recherche

Bien que la revue de littérature relate plusieurs travaux concernant l'effet des additifs de graphène et de cire en usinage, ceux-ci se limitent au procédé de détournage des CFRP ou encore au procédé de perçage des GFRP. L'objectif principal de cette recherche est d'analyser l'effet combiné de l'ajout des additifs de graphène et de cire pour le procédé de perçage des CFRP. À notre connaissance, cet aspect n'a pas été traité dans la littérature, ce qui constitue une innovation importante. Les sous-objectifs spécifiques permettant d'y arriver sont les suivants :

- Élaborer un plan d'expérience complet considérant différentes concentrations de cire et de graphène et une large gamme de paramètres de coupe (vitesses de coupe et vitesses d'avance) s'appuyant sur la littérature et les travaux précédemment réalisés par l'équipe de l'ÉTS (Chatelain et ses collaborateurs),

- Étudier la corrélation entre les paramètres d'entrée et l'intégrité de surface produite suite au perçage (rugosité et délaminage),
- Étudier la corrélation entre les paramètres d'entrée et la température de l'outil observée durant la coupe, celle-ci étant directement liée à l'usure des outils selon la littérature,
- Étudier la corrélation entre les paramètres d'entrée et la force produite durant le perçage et vérifier si une relation est observée entre la température et la force produite.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

2.1 Introduction

Le plan expérimental pour l'élaboration des composites à fibre de carbone comprend plusieurs étapes essentielles, incluant la sélection rigoureuse des matériaux et la préparation des échantillons en CFRP. Un plan d'expérience a été conçu pour évaluer de manière systématique l'impact des additifs, principalement la cire et le graphène, ainsi que les paramètres d'usinage sur la qualité résultante suite au perçage de ces matériaux.

Pour répondre à cet objectif, neuf plaques composites ont été élaborées : une plaque témoin sans additif et huit plaques intégrant différentes formulations d'additifs. Ces plaques ont été percées à l'aide d'outils diamantés CVD, suivant un plan d'expérience croisant cinq vitesses de coupe avec cinq vitesses d'avance, offrant ainsi une large gamme de conditions d'essais. Pour chaque trou percé, des mesures répétées ont été effectuées afin d'analyser précisément les efforts de coupe, les températures générées, la rugosité des surfaces ainsi que le facteur de délaminage. Cette méthodologie exhaustive permet de comprendre finement les interactions entre formulation, paramètres d'usinage et qualité finale du perçage.

2.2 Description du plan expérience

Le plan expérimental adopté pour cette étude comprend la fabrication de neuf plaques composites à base de fibres de carbone, dont huit avec différents pourcentages d'additifs (cire et graphène) et une plaque sans additif servant de référence telle que montrée sur le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Les pourcentages des produits utilisés lors de la production des plaques

Mélange N°	% Cire	% Graphène
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%

Ces plaques ont été soumises à des opérations de perçage réalisées à l'aide d'outils diamantés CVD de diamètre 7/32 po., avec une variation systématique de deux paramètres clés : la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, chacune à cinq niveaux différents.

Tableau 2.2 Paramètres de coupe

Vitesses de coupes (mm /min)	Vitesses d'avances (mm/rev)
50	0,005
100	0,02
150	0,05
200	0,08
250	0,11

Chaque plaque a donc été percée suivant un protocole expérimental rigoureux associant cinq vitesses de coupe et cinq vitesses d'avance, ce qui a permis d'explorer un large éventail de conditions d'usinage.

Pour garantir la fiabilité statistique des résultats et la reproductibilité des mesures, chaque essai a été répété trois fois, ce qui représente un total de 75 trous percés par plaque (5 vitesses de coupe $\times$ 5 vitesses d'avance $\times$ 3 répétitions).

Pour chacun de ces trous, plusieurs types de mesures ont été effectués afin d'évaluer la qualité du perçage et les influences des paramètres expérimentaux.

Ces mesures incluent les efforts de coupe enregistrés pendant le perçage, les températures générées au contact de l'outil, la rugosité de surface des trous obtenus ainsi que le facteur de délaminage, qui est un indicateur clé de l'intégrité structurale du composite après usinage.

Cette approche expérimentale vise à établir clairement les liens entre la composition des composites, les paramètres de coupe et la qualité de perçage obtenue. Elle permet ainsi de déterminer les conditions optimales de perçage qui minimisent les défauts tels que le délaminage et la rugosité, tout en maximisant les performances mécaniques et la qualité des pièces en composite usinées.

2.3 Le choix des matériaux

2.3.1 Matrice de résine époxy

La matrice utilisée pour la fabrication des échantillons est une résine d'époxyde thermodurcissable de marque SikaBiresin[®] CR72 (figure 2.1) produite par la compagnie Sika AG, une multinationale suisse spécialisée dans la chimie de la construction et de l'industrie. Cette résine est destinée à la stratification dûe à son adhérence et sa résistance mécanique et chimique élevées.



Figure 2.1 Résine et durcisseur

2.3.2 Fibres de carbone

Dans le cadre de cette étude, le choix du renfort composite s'est porté sur des tissus de fibres de carbone unidirectionnelles TC-09-U, fabriqué par Texonic® (figure 2.2), reconnus pour leur excellente résistance mécanique et leur légèreté. L'intégration de ces tissus de carbone vise à améliorer les performances globales du matériau composite, en améliorant la résistance à la traction et la durabilité tout en maintenant un faible poids. La combinaison de ces propriétés permet d'obtenir des composites performants et polyvalents, convenant à des secteurs où la fiabilité et la masse réduite sont essentielles, comme l'aéronautique ou le sport de haut niveau.



Figure 2.2 Fibres de carbone

2.3.3 Additifs de graphène et de cire

Dans le cadre de notre étude, des additifs spécifiques ont été incorporés afin d'optimiser les propriétés mécaniques du composite. Pour cela, la cire Ceraflour 996, fournie par le fabricant BYK USA Inc., a été utilisée pour améliorer la résistance à l'abrasion, la glissance de surface et la durabilité structurale du matériau. De plus, du GrapheneBlack 0X, un type de graphène produit par NanoXplore, a également été ajouté en différentes proportions dans la matrice polymère afin d'augmenter la conductivité et la résistance mécanique du composite.

2.4 Élaboration des plaques

Neuf plaques ont été fabriquées, comprenant huit plaques avec différents pourcentages d'additifs et une plaque témoin sans additif à titre de référence.

Le tableau 2.1 montre les pourcentages en masse utilisés dans la fabrication de chaque plaque. Les pourcentages en poids de chaque constituant sont calculés ainsi :

$$Wg = (wt. \%)g * Wt \quad (2.1)$$

$$Wc = (wt. \%)c * Wt \quad (2.2)$$

$$WA = Wg + Wc = Wt * (wt. \%)g + (wt. \%)c \quad (2.3)$$

$$Wd = 0,18 Wep \quad (2.4)$$

$$Wt = Wep + WA + Wd \quad (2.5)$$

$$WA = (((wt. \%)g + (wt. \%)c) * 1,18 Wep) / ((1 - ((wt. \%)g + (wt. \%)c))) \quad (2.6)$$

Dans cette étude, les notations suivantes sont utilisées : Wd désigne la masse du durcisseur (en g), Wg correspond au pourcentage massique de graphène, Wc à celui de la cire, tandis que Wep représente la masse de la résine époxy (en g). La variable WA regroupe la proportion totale de graphène et de cire, et Wt indique la masse totale (en g).

La préparation de la résine suit le protocole schématisé à la figure 2.3. Elle débute par l'incorporation des additifs dans la résine, suivie d'une étape de dégazage. Le durcisseur est ensuite ajouté, et le procédé s'achève par la mise en forme des stratifiés.

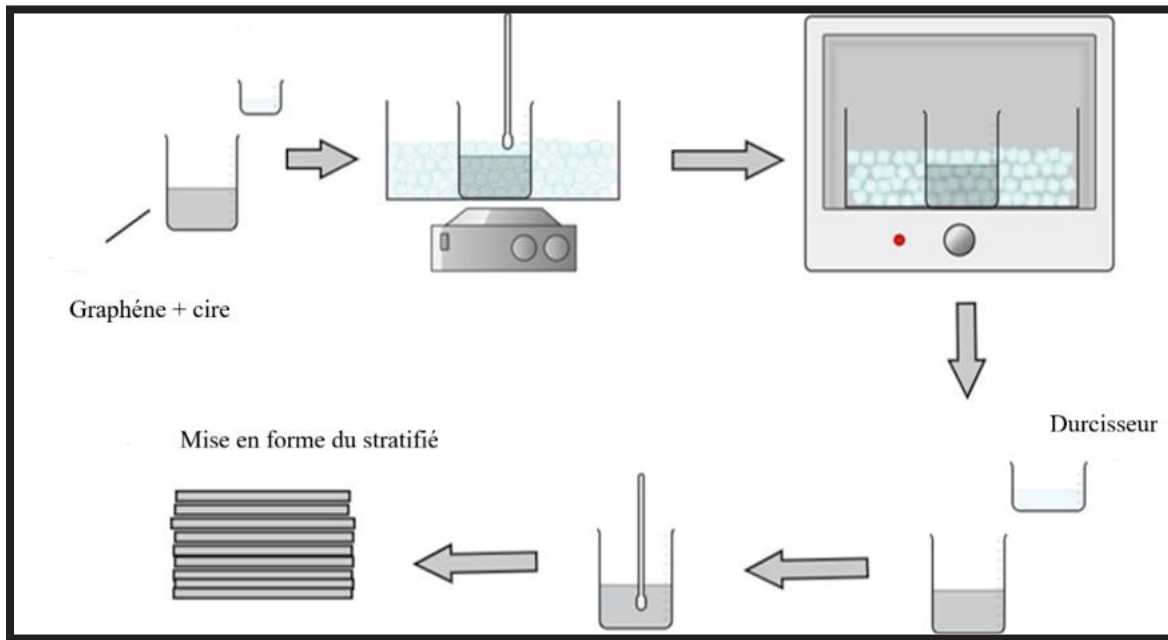


Figure 2.3 Protocole d'élaboration des composites pour avoir une meilleure homogénéisation

2.4.1 Mélange des additifs

À cette étape, tous les additifs sont incorporés dans la résine. Le mélange est effectué pendant une heure à l'aide d'un mélangeur mécanique à haut cisaillement (Silverson L5M-A) à une vitesse de 3500 tr/min (figure 2.4). Cela garantit une dispersion homogène des additifs dans la résine.

Pendant le mélange, le bécher contenant la résine est placé dans un bain d'eau glacée pour dissiper la chaleur générée par le processus de cisaillement élevé et éviter la surchauffe du mélange.

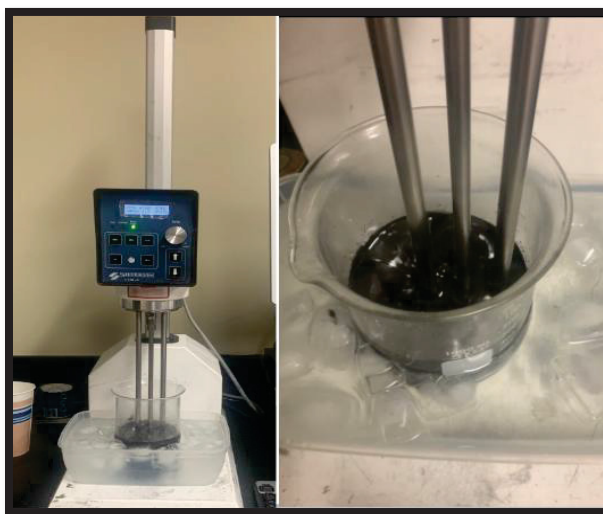


Figure 2.4 Préparation d'un mélange d'époxy incorporant du graphène et de la cire dans un bain de glace.

2.4.2 Élimination des bulles d'air

Dans le cadre de notre processus de fabrication une étape cruciale de dégazage est effectuée. Cette étape vise à éliminer les bulles d'air introduites lors du mélange mécanique, garantissant ainsi une qualité optimale de la résine. Pour ce faire, le bécher contenant le mélange est placé dans un bain glacé, puis inséré dans une étuve (figure 2.5). Cette méthode assure une résine homogène et sans défauts essentielle pour la performance des stratifiés composites renforcés en fibres de carbone.



Figure 2.5 a) étuve b) mélange de cire, graphène ajoutée à la résine

- Ajout de durcisseur

Une fois le mélange des additifs terminé et la résine dégazée, le durcisseur est ajouté selon le ratio prescrit par le fournisseur. Ce mélange est effectué manuellement pour initier le processus de polymérisation.

- Fabrication des plaques

Dans ce travail, le moulage au contact a été retenu comme procédé privilégié pour la fabrication des plaques en fibre de carbone, grâce à ses avantages en termes de flexibilité, de coût et de maîtrise technique, ce qui en fait une méthode idéale pour la réalisation de pièces composites en contexte expérimental. La préparation commence par le nettoyage méticuleux du moule, le recouvrement avec un film plastique lisse, et l'application d'un agent de démoulage afin de garantir à la fois une surface impeccable et un retrait facile après durcissement. Les tissus de fibres de carbone unidirectionnelles sont ensuite superposés selon une séquence précise : une première couche de résine modifiée est étalée sur le moule, suivi de la pose d'un pli de tissu imprégné à l'aide d'un rouleau manuel pour assurer l'élimination des bulles d'air et une bonne compaction. Les couches suivantes sont croisées, généralement à 0° et 90° , pour optimiser la performance mécanique du stratifié.

Ce processus est répété jusqu'à obtenir 16 plis, conduisant à une épaisseur finale de 5 mm. Pour homogénéiser l'imprégnation et limiter les défauts, la technique VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) est ensuite employée (figure 2.6), permettant une distribution uniforme de la résine à travers le stratifié. Enfin, l'assemblage est placé sous presse à 60 °C, avec des cales de 5 mm d'épaisseur aux pièces pour contrôler l'épaisseur finale, garantissant le bon durcissement et des propriétés mécaniques optimales à la pièce obtenue.

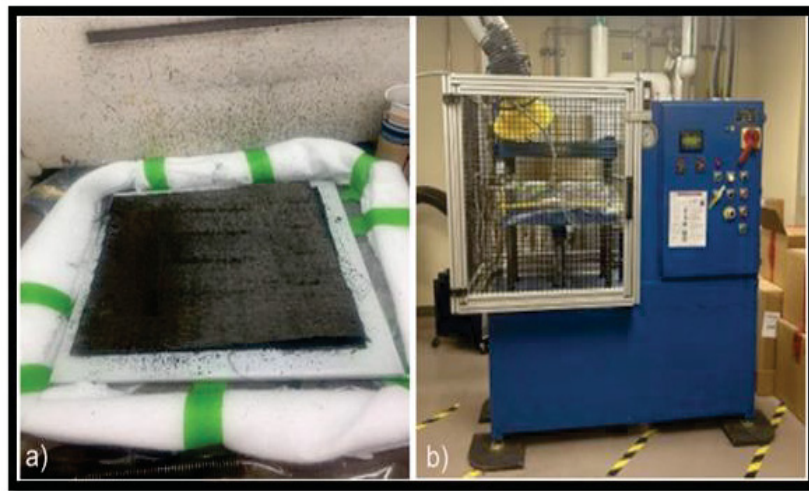


Figure 2.6 a) Préparation du plaque CFRP b) Presse hydraulique employée pour le moulage et la consolidation du matériau composite

- Préparation au perçage

Toutes les plaques stratifiées ont été découpées en dimension de 300 mm sur 160 mm à l'aide d'une scie circulaire munie d'un disque diamanté. Elles ont ensuite été percées pour permettre la fixation dans le gabarit de perçage avant le début des opérations d'usinage (figure 2.7).

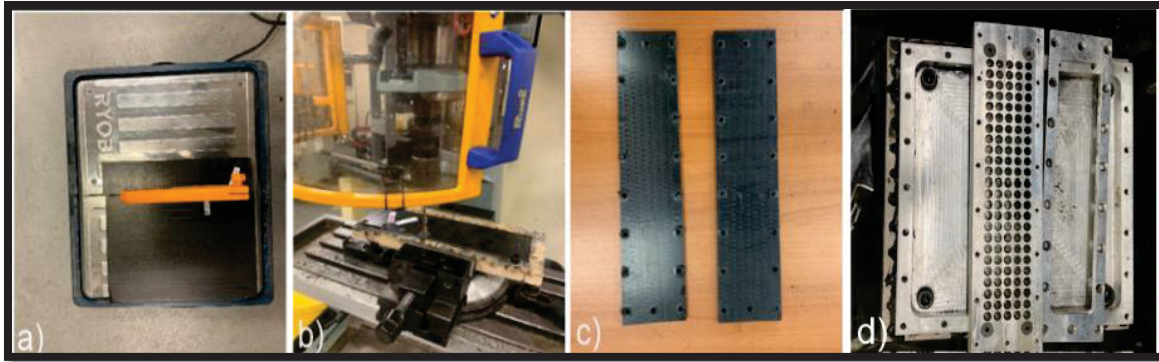


Figure 2.7 Étapes de découpe et de perçage des composites a) découpe des stratifiés, b) perçage du gabarit, c) finition des plaques, d) gabarit de perçage

2.5 Description du protocole d'usinage des plaques en résine époxy modifiée

L'instrumentation du processus de perçage repose sur deux équipements principaux : un dynamomètre Kistler 9255B et une caméra thermique. Le dynamomètre, monté sur la table de la machine CNC, permet la mesure précise des forces selon les trois axes (F_x , F_y , F_z) pendant l'opération de perçage. La caméra thermique, positionnée stratégiquement, capture en temps réel l'évolution de la température dans la zone de coupe. La procédure d'usinage débute par une fixation rigoureuse de la plaque CFRP sur le dynamomètre, garantissant une stabilité parfaite pendant l'usinage. Avant chaque série de perçage, un protocole de vérification systématique est effectué : alignement de la plaque et validation des paramètres de coupe (vitesse de coupe et vitesse d'avance).

Le processus de collecte des données s'effectue en continu pendant l'opération de perçage. Les forces sont enregistrées à haute fréquence via le dynamomètre, permettant une analyse fine des efforts de coupe. La température est suivie en temps réel grâce à la caméra thermique, fournissant une cartographie thermique complète de la zone d'usinage. Des observations visuelles complémentaires sont systématiquement documentées pour chaque trou.

Les paramètres de coupe pour le perçage des différentes plaques sont établis selon des valeurs recommandées au tableau 2.2 pour optimiser la qualité d'usinage et la durée de vie de l'outil.

En considérant les quatre vitesses de coupe, les quatre vitesses d'avance et les trois répétitions, un total de 75 trous sera effectué pour chaque plaque tel que montré sur la figure 2.8.

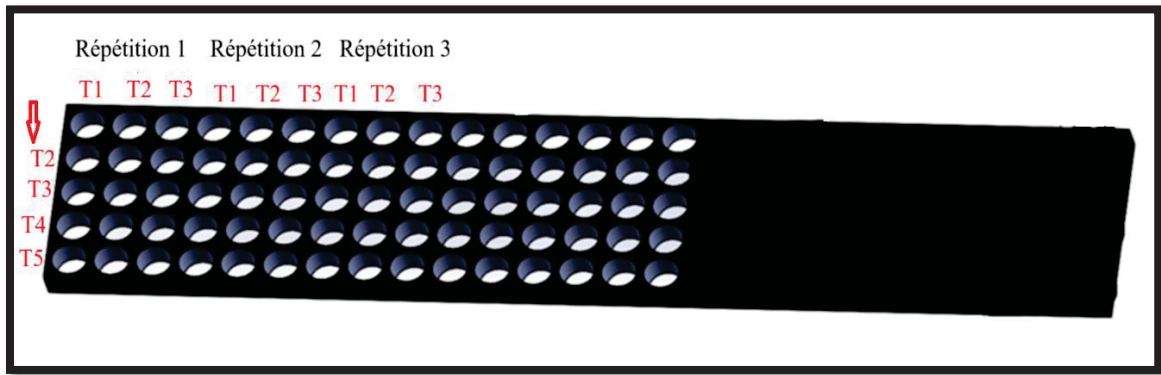


Figure 2.8 Schéma de répartition des trous pour les essais d'usure

2.6 Perçage des plaques échantillons

2.6.1 Machine-outil à commande numérique (CNC)

Le perçage a été réalisé à l'aide de la fraiseuse CNC trois axes Huron K2x10, illustrée en figure 2.9. Cette machine est dotée de caractéristiques avancées qui permettent un usinage précis et efficace des matériaux. Ses principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 2.3



Figure 2.9 Machine CNC Huron K2x10

Tableau 2.3 Caractéristiques principales du centre d'usinage Huron K2x10

Caractéristique	Valeur
Vitesse de rotation	15 000 <u>rpm</u>
Puissance	23,6 kW (32,09 <u>hp</u>)
Course X	700 mm (27,56 in)
Course Y	600 mm (23,62 in)
Course Z	500 mm (19,69 in)
Vitesse d'avancement axe X	40 000 mm/min (26,25 in/s)
Vitesse d'avancement axe Y	40 000 mm/min(26,25 in/s)
Vitesse d'avancement axe Z	40 000 mm/min (26,25 in/s)

2.6.2 Outil de coupe et acquisition de sa température pendant l'usinage

Les outils de coupe utilisés sont des forets à facettes de la marque CoreHog, de diamètre 7/32 po. (figure 2.10), fabriqués avec précision aux États-Unis. Spécialement conçus pour divers composites et plastiques, ils peuvent être utilisés manuellement ou sur machine CNC. Ces forets sont dotés d'un revêtement DLC (Diamant-Like Carbon) appliqué par procédé de vaporisation CVD (Chemical Vapor Deposition), ce qui offre une très bonne résistance à l'usure. Ces forets en carbure monobloc sont idéaux pour une variété d'applications.

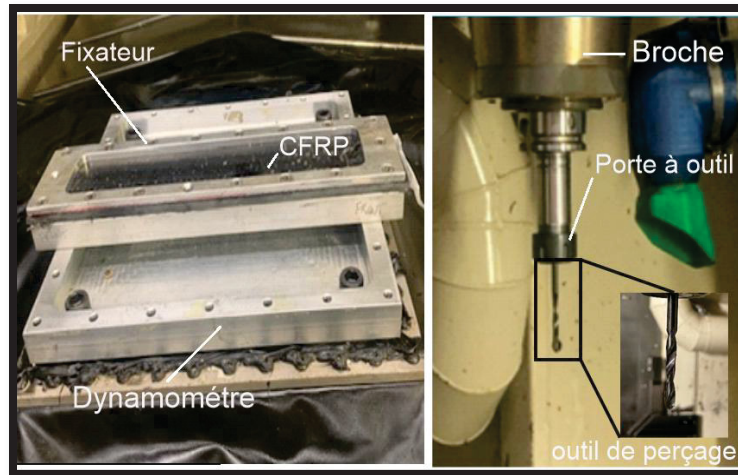


Figure 2.10 Montage de l'outil de coupe et du dispositif d'usinage sur la table dynamométrique

Une caméra thermique VarioCAM® HD head 900, comme illustrée en figure 2.11, est installée dans la machine-outil afin d'enregistrer l'évolution de la température de l'outil pendant le processus de perçage. Cette caméra mesure la température d'un objet en analysant son rayonnement infrarouge, fondé sur le principe du corps noir. Selon cette théorie, tout corps émet un spectre continu d'ondes électromagnétiques, dont la distribution varie avec la température. À température ambiante, le maximum d'intensité de ce spectre se situe dans le domaine infrarouge. Lorsqu'un objet chauffe, le pic d'émission se déplace vers des fréquences plus élevées. Les vidéos enregistrées ont été examinées afin de déterminer la température maximale grâce au logiciel GRAYESS IRT Analyser, et de calculer les températures moyennes lors du perçage. Ces données ont ensuite été utilisées pour le traitement des données thermiques.



Figure 2.11 Caméra thermique dans son boîtier protecteur en aluminium

2.7 Mesure des forces de perçage

L'acquisition et le traitement des données issues de la table dynamométrique permettent de mesurer les forces générées pendant l'opération de perçage selon trois axes orthogonaux (X, Y et Z). Dans le cadre de cette étude, l'attention est particulièrement portée sur la composante axiale Z de la force, appelée force de perçage.

Le traitement des signaux de poussée a été réalisé à l'aide d'un programme Matlab™, qui enregistre ensuite les données analysées dans un fichier Excel dédié.

Le processus de perçage peut être décomposé en plusieurs phases distinctes tel que montré sur la figure 2.12. Ces phases sont délimitées par des points caractéristiques, de A à F, chacun représentant une étape spécifique de l'opération de perçage. Le point A identifie le premier contact entre l'outil et la pièce. Le point B indique le début effectif du perçage. Le point C correspond au régime de plein perçage, où la force de poussée atteint son maximum. Le point D signale la perforation du dernier pli du composite.

Le point E représente la fin de course du perçage et le début de la remontée du foret, tandis que le point F marque la sortie complète de l'outil.

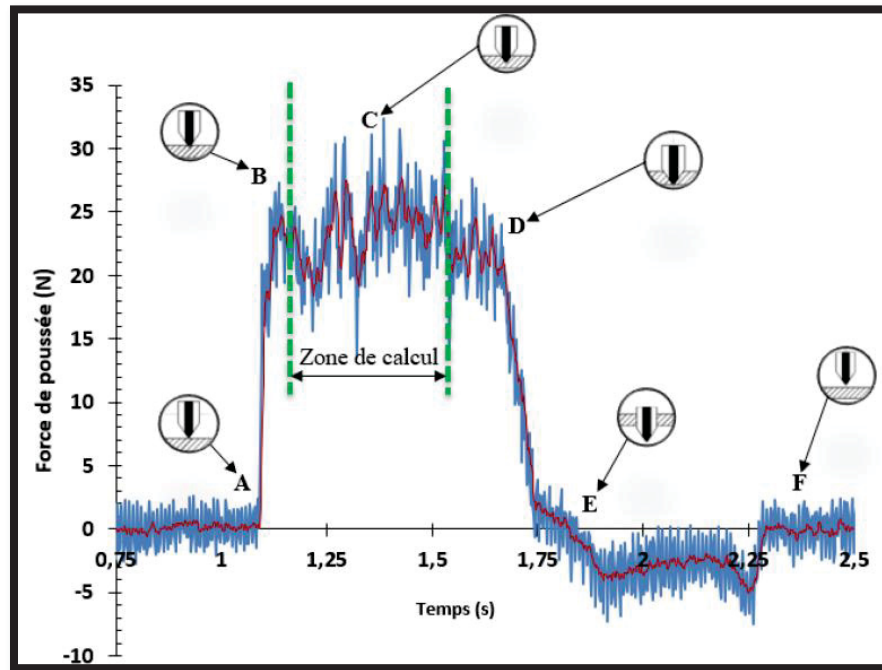


Figure 2.12 Analyse de la force de poussée au cours du perçage d'un composite (Thierry Stéphane TCHOUTENG, 2020)

Pour obtenir une mesure représentative de la force de perçage, une zone de calcul spécifique a été définie. Cette zone se situe entre le point B et le point D, mais légèrement décalée de ces points pour éviter les effets transitoires. Dans cette zone, la force moyenne est calculée dans des conditions stabilisées de coupe.

Cette méthodologie est illustrée par un exemple concret où les paramètres de coupe sont fixés à 6000 rpm pour la vitesse de rotation et 0,08 mm/rev pour l'avance, démontrant la répétabilité et la fiabilité de cette approche de mesure (Thierry Stéphane TCHOUTENG, 2020).

2.8 Mesure des températures de coupe

L'analyse des images thermiques (figure 2.13) montre une forte variation de température selon la zone observée de l'outil. Cette différence vient surtout de sa composition hétérogène.

Les mesures ont été prises sur les arêtes de coupe et sur la partie métallique, ce qui assure une meilleure fiabilité. Mais l'usinage complique la situation : un brouillard de copeaux se forme autour de l'outil. Il perturbe les images thermographiques et réduit la précision des températures enregistrées.

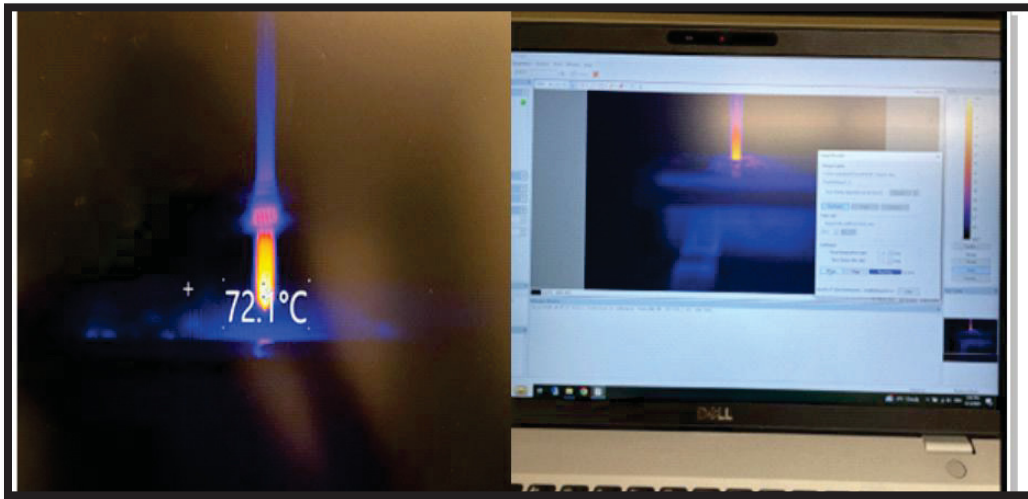


Figure 2.13 Analyse de la température de l'outil après perçage, réalisée avec les paramètres de ($V_c=50\text{mm/min}$ et $N_f=0.02\text{mm/rev}$) à l'aide du logiciel GRAYESS IRT Analyzer

2.9 Mesure de délaminage et longueur des fibres non coupées

Dans cette étude, deux défauts majeurs sont étudiés : le délaminage et les fibres non coupées. Le délaminage correspond à un arrachement de matière dans la pièce. Les fibres non coupées, elles, désignent celles qui dépassent de la surface parce qu'elles n'ont pas été entièrement sectionnées lors de l'usinage. L'évaluation repose sur un microscope optique. Il fournit des photographies précises des échantillons. Ces images sont ensuite traitées avec le logiciel

ImageJ, qui identifie les zones touchées et mesure l'étendue des délaminages ainsi que la présence de fibres résiduelles.

Cette approche permet une quantification rigoureuse et reproductible des défauts. Le facteur de délaminage est calculé à partir des diamètres (figure 2.14). Chaque condition d'usinage définie par la vitesse de coupe et la vitesse d'avance est testée trois fois.

Le délaminage moyen correspond donc à la moyenne des trois valeurs obtenues.

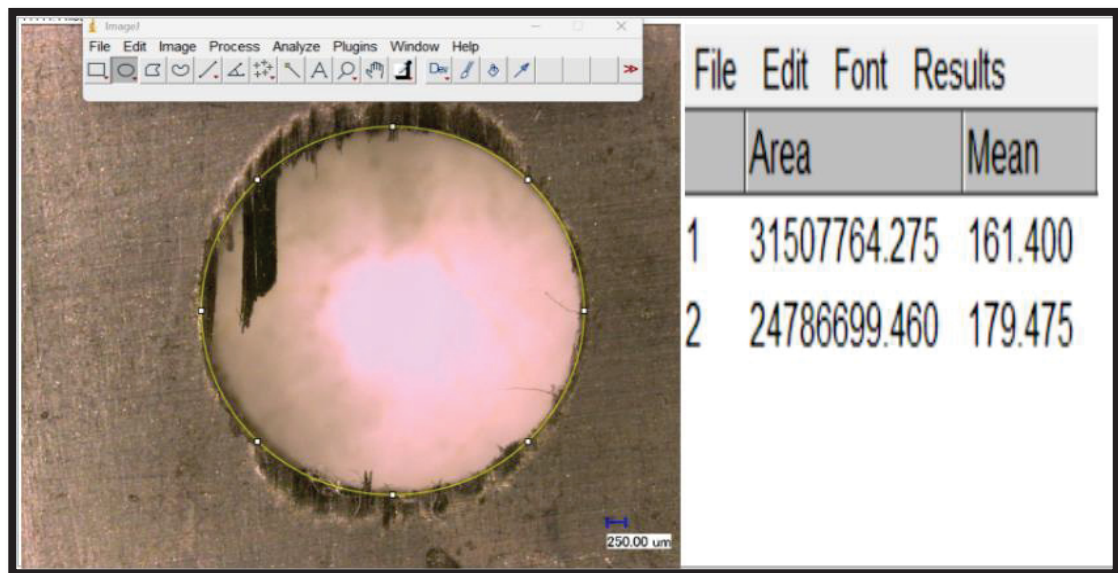


Figure 2.14 Observation microscopique : analyse de surface et mesure de diamètre

De façon analogue au calcul du facteur de délaminage, le taux moyen de rupture des fibres pour une condition d'usinage donnée est déterminé à partir des trois mesures correspondant aux fibres non coupées obtenues sur les trois trous percés dans cette même condition.

La figure 2.15 illustre les résultats de mesure des zones de fibres non sectionnées observées sur différents trous, réalisés pour cinq valeurs de vitesse d’avance, avec une vitesse de coupe maintenue constante à 250 mm/min et une avance fixée à 0,02 mm/rev.

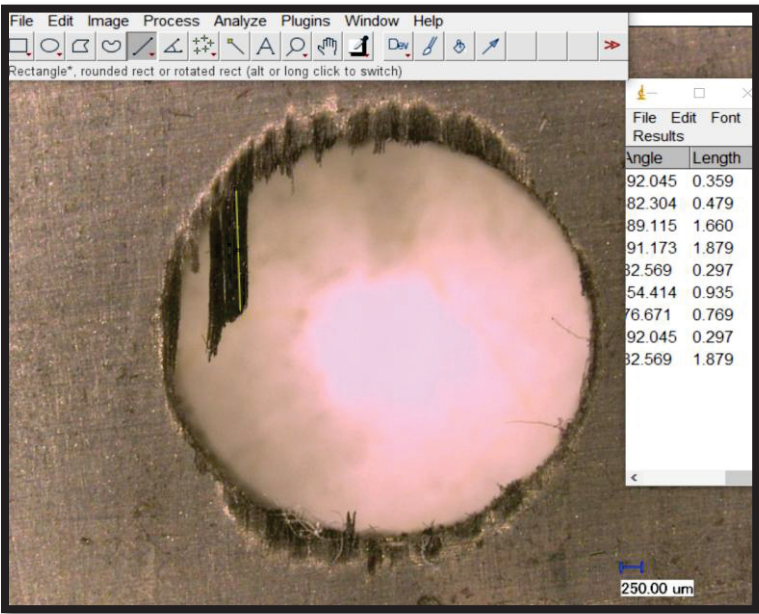


Figure 2.15 Observation microscopique : mesure de longueur des fibres non coupées

2.10 Mesure de rugosité

Les mesures de rugosité ont été effectuées avec le profilomètre Mitutoyo SJ-410, conformément à la norme ISO 4284-1997. Le tableau 2.4 présente les conditions de mesure retenues.

Tableau 2.4 Paramètres de réglage de profilomètre.

Paramètres	Ra
Profondeur du trou	5 mm
Nombre de mesure	3
Longueur de mesure	0,8
Longueur d’évaluation	4
Range of Ra	0,1<Ra< 2

La rugosité arithmétique R_a a été relevée en trois points pour chaque trou, soit un total de neuf mesures par condition de coupe (trois trous répétés, chacun analysé en trois points). À partir de ces données, la moyenne et l'écart type ont été déterminés. À titre d'exemple, la figure 2.16 présente les signaux de mesure de R_a enregistrés en un point du trou.

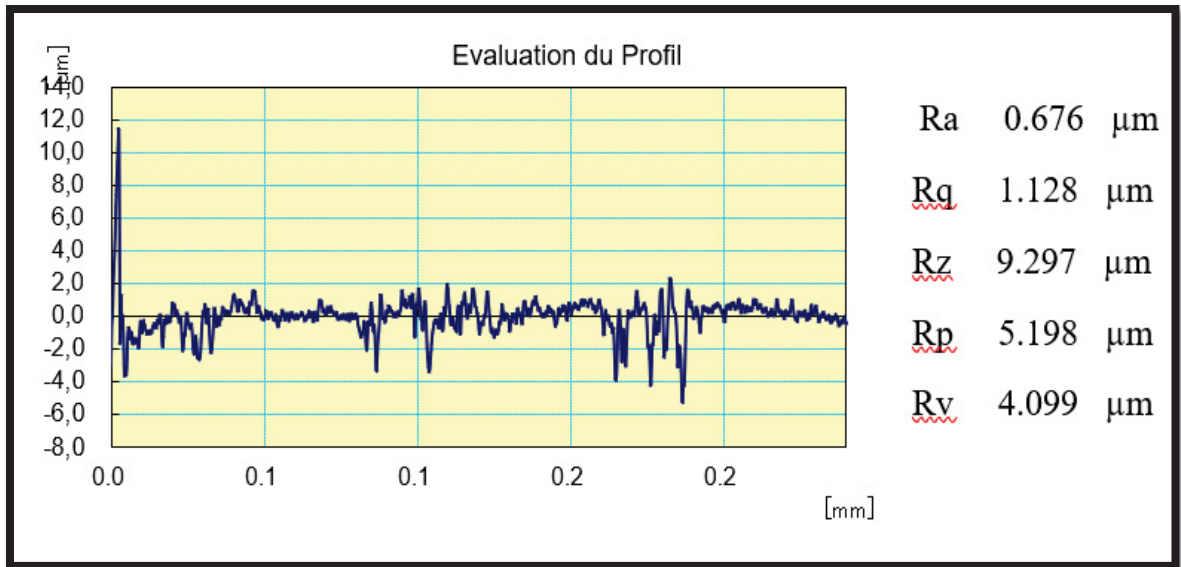


Figure 2.16 Signaux de mesures de rugosités en seul point de trou

CHAPITRE 3

ANALYSE DES RÉSULTATS

3.1 Effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur la force perçage

La figure 3.1 met en évidence l'évolution de la force moyenne exercée lors du perçage de toutes les plaques, sans égard à leur composition, selon les vitesses de coupe et d'avance utilisées. Dans cette analyse, l'influence des proportions de graphène et de cire présentes dans les échantillons n'est pas prise en compte, afin de se concentrer exclusivement sur l'impact des paramètres d'usinage. Le premier graphique représente les moyennes des forces de perçage pour toutes les plaques. On observe une stabilité remarquable des forces de coupe (entre 38 N et 39 N) malgré l'augmentation de la vitesse de coupe de 50 à 250 mm/min. Le second graphique révèle une augmentation exponentielle des forces avec l'avance par tour, passant de ~10 N à 65 N. La vitesse d'avance est le paramètre le plus influent sur la force de perçage des composites CFRP, expliquant la majorité des variations mesurées. Une augmentation de l'avance accroît fortement les efforts de coupe, l'usure de l'outil et la détérioration de la qualité de surface. À l'inverse, la vitesse de coupe a un effet plus limité (Bolat et al., 2023). L'analyse ANOVA présentée dans l'annexe III confirme ces résultats.

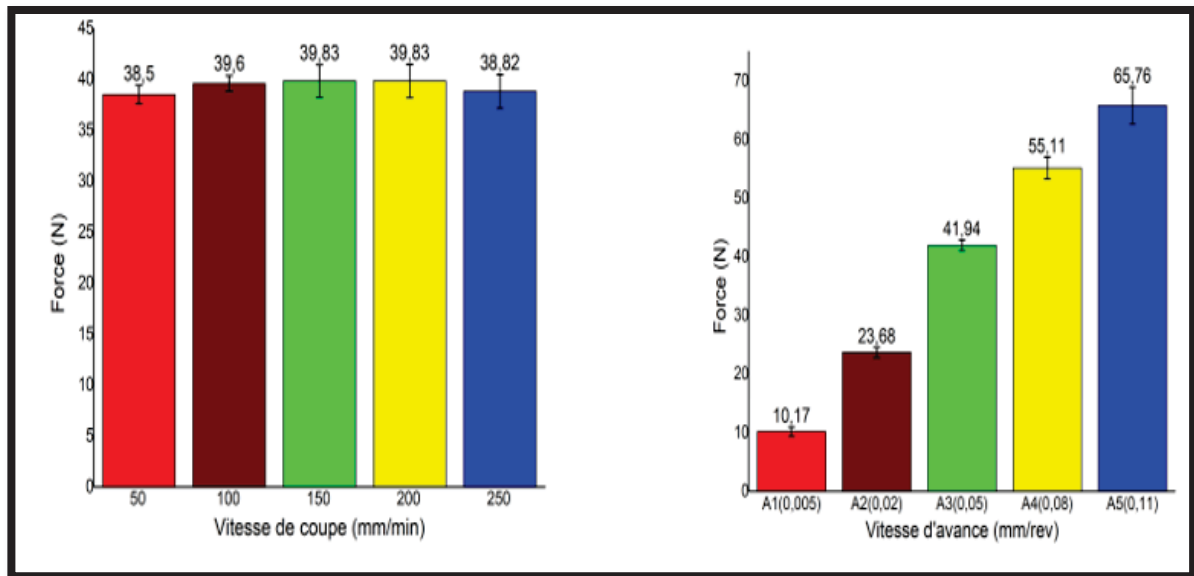


Figure 3.1 Effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur la force de poussée

3.2 Influence de la vitesse de coupe sur la force de perçage de l'ensemble des plaques composites

La figure 3.2 illustre l'évolution de la force moyenne de perçage mesurée pour chaque plaque, selon les proportions de graphène et de cire intégrée dans la matrice composite, et selon différentes vitesses de coupe appliquées.

Dans cette analyse, la vitesse d'avance est maintenue constante ou non prise en compte, afin de se concentrer exclusivement sur l'impact de la vitesse de coupe. Cette représentation permet ainsi de comparer, pour chaque configuration de plaque, la manière dont la force exercée par l'outil varie avec la vitesse de coupe.

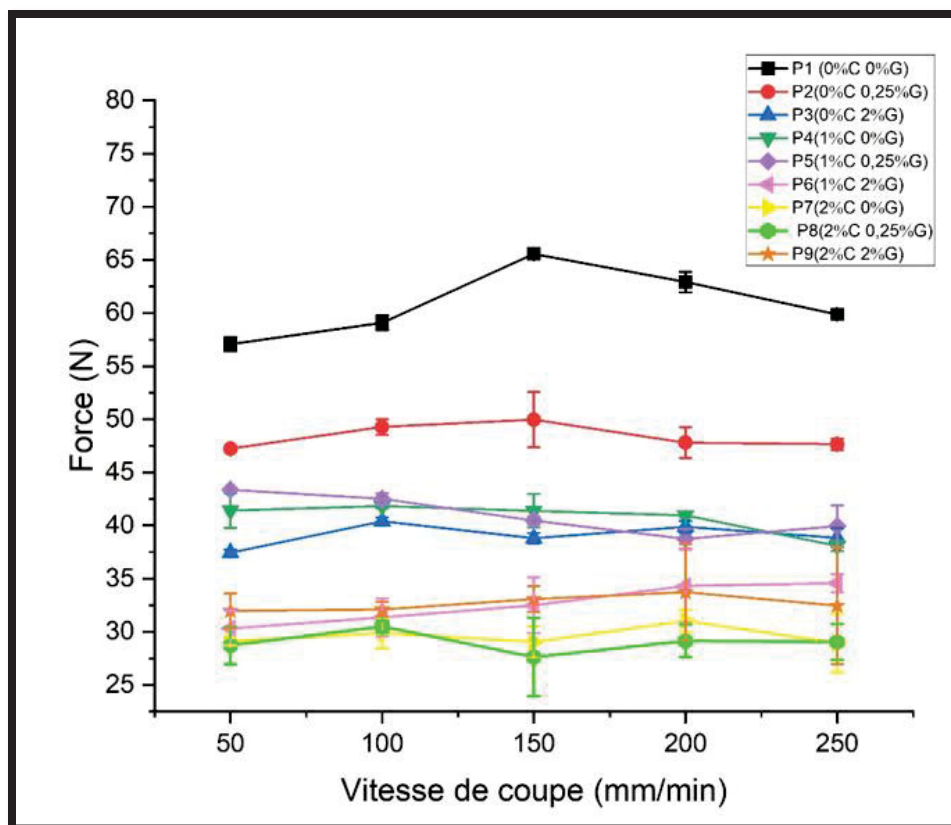


Figure 3.2 Variation de la force en fonction de la vitesse de coupe sans égard à la vitesse d'avance

Le graphique montre des variations nettes des forces de coupe selon les plaques composites testées. Les vitesses de coupe vont de 50 à 250 mm/min, sans tenir compte de l'effet de la vitesse d'avance. Les mesures expérimentales révèlent une tendance stable : la force de perçage reste presque constante malgré l'augmentation progressive de la vitesse. Cela suggère une régularité mécanique dans cette plage de vitesses.

Enfin, les plaques peuvent être classées en trois groupes distincts, en fonction du niveau des forces enregistrées. En premier lieu, les plaques sources de forces élevées, notamment la référence P1 (0 % cire, 0 % graphène), représentée par la courbe noire, affichent une force maximale de l'ordre de 65 N, avec un pic marqué à 150 mm/min. La plaque P2 (0 % C, 0,25 % G), bien qu'incorporant du graphène, conserve des forces relativement élevées (48–50 N), avec

une légère tendance à l'augmentation. Le second groupe inclut les plaques à forces modérées (P3, P4, P5, P6), présentant des valeurs comprises entre 35 et 42 N. Ces plaques montrent un comportement relativement constant sur l'ensemble de la plage de vitesses de coupe, indiquant des performances intermédiaires et une certaine efficacité liée à l'ajout partiel de cire ou de graphène, les plaques P7, P8 et P9 affichent les forces de coupe les plus faibles, soit entre 25 et 35 N. Ce niveau réduit traduit une usinabilité optimale.

Ces faibles efforts indiquent une meilleure aptitude à la coupe et limitent les contraintes mécaniques durant l'opération. L'analyse montre aussi que l'ajout de cire, surtout à 2 %, contribue à cette baisse des forces. Son rôle probable est celui d'un lubrifiant, réduisant les frictions entre l'outil et le matériau composite.

3.3 Effet de la vitesse de coupe sur la température

La Figure 3.3 ci-dessous illustre les températures maximales moyennes des thermocouples. Ce graphique montre la température de coupe (en °C) enregistrée lors du perçage de diverses plaques composites en fibres de carbone, en fonction de la vitesse de coupe, allant de 50 à 250 mm/min. Chaque courbe représente une formulation distincte du composite, avec des variations dans les pourcentages de cire (C) et de graphène (G).

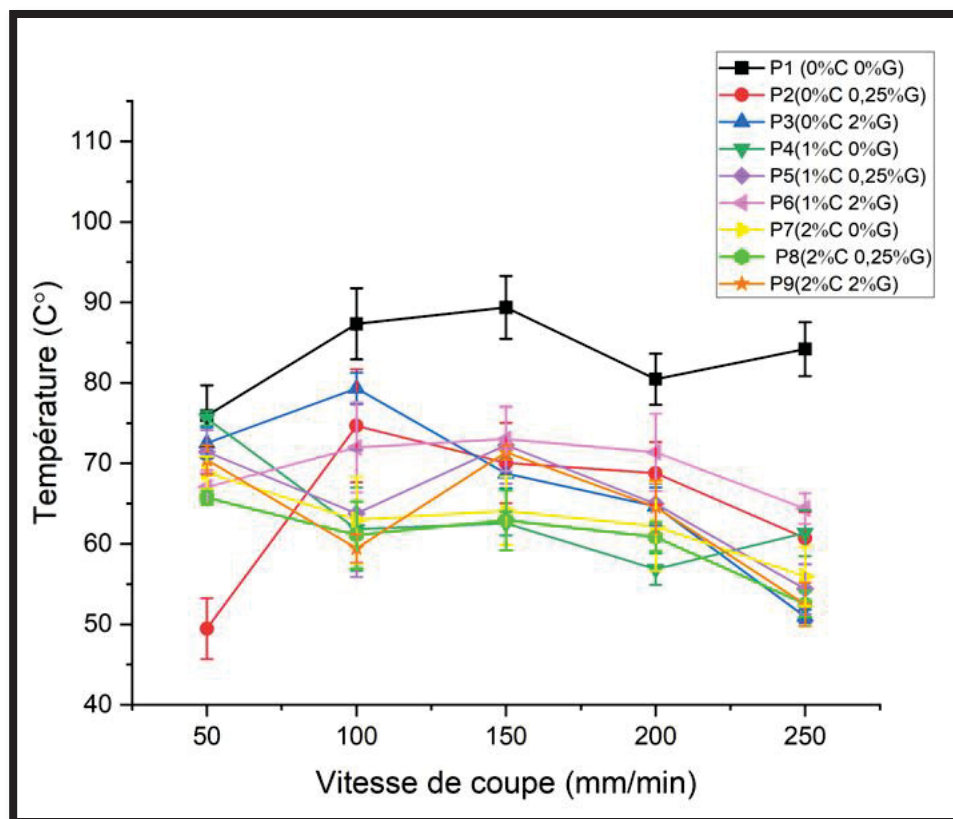


Figure 3.3 Variation de la température en fonction de la vitesse de coupe sans égard à la vitesse d'avance

L'analyse des résultats présentés dans le graphique met en évidence des différences significatives de température de coupe selon la composition des plaques testées. La plaque P1, sans cire ni graphène, montre les températures de coupe les plus élevées, entre 80 et 90 °C, avec un pic marqué autour de 150 mm/min. Ce comportement vient de la faible conductivité thermique de la matrice époxy pure. La chaleur ne se dissipe pas correctement et s'accumule localement à l'interface outil-matière. Les plaques P2 à P9, enrichies en cire, en graphène ou en combinaison, affichent des températures plus basses. Elles se maintiennent entre 55 et 75 °C, quel que soit le niveau de coupe. Les additifs thermo conducteurs assurent une meilleure dispersion de la chaleur. Dans la plupart des cas, la température reste stable et peut même diminuer légèrement quand la vitesse dépasse 150 mm/min.

Ces résultats démontrent clairement l'effet bénéfique de la cire et du graphène. En favorisant la dissipation thermique, ils réduisent la température de coupe et protègent le composite contre la surchauffe et les dommages thermiques.

3.4 Effet de la vitesse d'avance sur la température

Le graphique de la figure 3.4 présente les variations de température de l'outil de perçage durant le perçage de composites en fibre de carbone, pour neuf plaques distinctes caractérisées par des proportions variables de cire et de graphène dans leur composition.

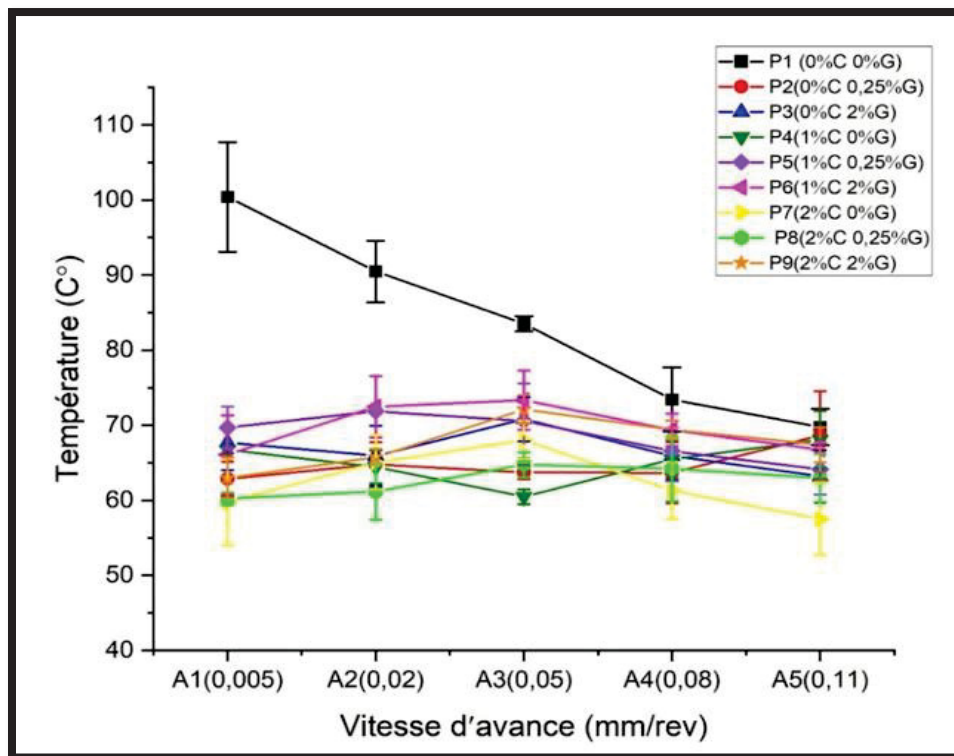


Figure 3.4 Variation de la température en fonction de l'avance sans égard à la vitesse de coupe

L'analyse du graphique révèle des comportements thermiques distincts selon la composition des plaques composites et la vitesse d'avance appliquée lors du perçage.

La plaque P1 (0 % cire, 0 % graphène), dépourvue d'additifs, présente systématiquement les températures de coupe les plus élevées sur l'ensemble des vitesses d'avance testées.

Toutefois, pour cette plaque, on observe que la température diminue progressivement à mesure que la vitesse d'avance augmente, traduisant une plus grande sensibilité thermique à ce paramètre d'usinage.

En comparaison, les plaques P2 à P9, enrichies en cire, en graphène ou en une combinaison des deux, se distinguent par des températures de coupe nettement plus basses et remarquablement stables, quelle que soit la vitesse d'avance utilisée. Chez ces formulations modifiées, l'évolution de la température en fonction de la vitesse d'avance demeure en effet beaucoup moins marquée que pour la plaque P1.

Ces résultats mettent en évidence l'impact positif de l'ajout de cire et/ou de graphène dans la matrice, permettant non seulement d'abaisser la température générée lors du perçage grâce à une meilleure conductivité thermique et une dissipation plus efficace de la chaleur mais aussi de limiter la variabilité thermique liée aux changements de vitesse d'avance.

3.5 Impact des vitesses de coupe sur le délaminage

La figure 3.5 illustre l'évolution de la délamination à la sortie de trou en fonction de la vitesse de coupe. L'ampleur du dommage a été quantifiée à l'aide du facteur de délamination D_f , défini comme le rapport entre le diamètre maximal de la zone endommagée et le diamètre nominal du trou ($D_f = D_{max}/D_{nom}$).

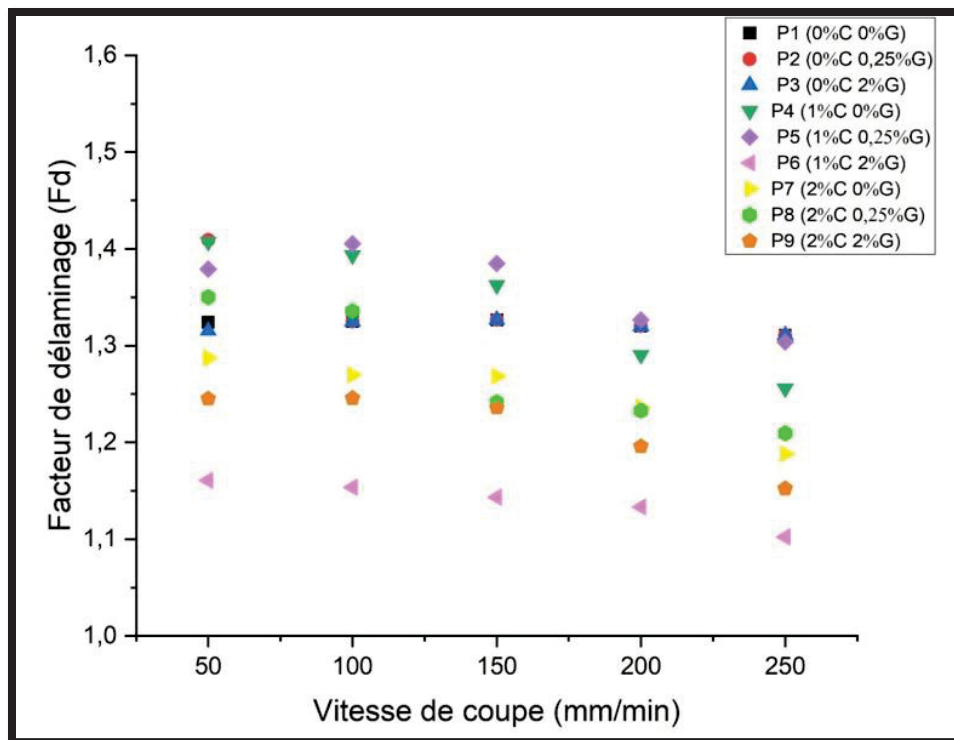


Figure 3.5 Variation du facteur de délaminage en fonction de la vitesse de coupe sans égard à la vitesse d'avance

L'analyse des résultats met en évidence que le facteur de délaminage varie en fonction de la vitesse de coupe appliquée lors du perçage des différentes plaques composites. On observe que pour certaines conditions expérimentales, une augmentation de la vitesse de coupe s'accompagne d'une diminution du facteur de délaminage, traduisant une meilleure intégrité de la sortie du trou. Cependant, dans d'autres cas, ce facteur demeure relativement stable, montrant une moindre sensibilité à ce paramètre de perçage. Plus précisément, les plaques P4 (1 % cire, 0 % graphène) et P5 (1 % cire, 0,25 % graphène) présentent, à toutes les vitesses testées, des valeurs de facteur de délaminage systématiquement plus élevées que les autres formulations, indiquant une plus grande propension à la dégradation en sortie de perçage pour ces compositions. À l'inverse, les plaques P6 (1 % cire, 2 % graphène) et P9 (2 % cire, 2 % graphène) se distinguent en affichant les facteurs de délaminage les plus faibles, quelles que

soient les conditions de coupe, témoignant d'une meilleure stabilité structurale et d'une résistance accrue à la propagation des dommages lors de perçage.

Ces observations soulignent l'influence déterminante de la formulation chimique des composites et en particulier du taux de graphène sur la tolérance à la délamination sous différentes vitesses de coupe.

3.6 Impact des vitesses d'avance sur le délaminage

Le graphe de la figure 3.6 présente le délaminage (Fd) à la sortie de trou en fonction de la vitesse d'avance.

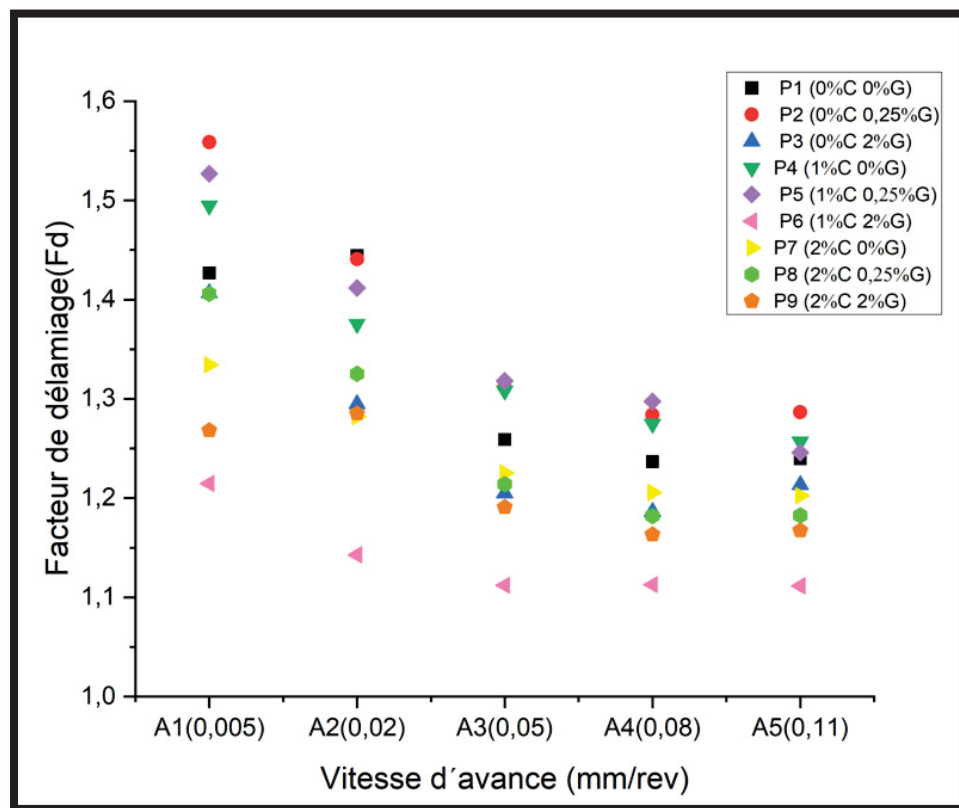


Figure 3.6 Évaluation du délaminage en fonction de la vitesse d'avance sans égard à la vitesse de coupe

Les résultats montrent que le facteur de délaminage diminue à mesure que la vitesse d'avance augmente, traduisant ainsi une réduction du risque d'endommagement en sortie de perçage aux vitesses d'avance plus élevées. Cette tendance se vérifie plus particulièrement pour les plaques P1 à P5, qui affichent des valeurs de facteur de délaminage relativement élevées, notamment aux vitesses d'avance les plus faibles, ce qui révèle une plus grande vulnérabilité structurelle pour ces formulations.

En revanche, les plaques P6, P7, P8 et P9 se distinguent par les facteurs de délaminage les plus bas, quelle que soit la vitesse d'avance, indiquant une bien meilleure stabilité structurelle et une résistance accrue à la propagation des défauts.

Ce comportement positif est fortement lié à l'apport du graphène, surtout lorsqu'il est combiné à la cire, ce qui semble renforcer significativement la cohésion du matériau et limiter la délamination lors du perçage. Ainsi, les résultats suggèrent clairement que l'optimisation des formulations par l'ajout de graphène et de cire, associée à l'utilisation de vitesses d'avance élevées, constitue une stratégie efficace pour améliorer la qualité des opérations de perçage et minimiser les défauts d'intégrité des composites.

3.7 Effet de la vitesse de coupe sur la longueur des fibres non coupées

La figure 3.7 illustre l'évolution de la longueur des fibres non coupées en fonction de la vitesse de coupe (mm/min) pour différentes formulations de plaques. Chaque point des courbes représente la moyenne des longueurs mesurées pour un niveau de vitesse de coupe donné, accompagné de barres d'erreur traduisant la variabilité expérimentale. La longueur des fibres non coupées constitue un indicateur clé de la qualité d'usinage : plus cette valeur est faible, plus l'efficacité de coupe est grande, traduisant une meilleure coupe des fibres lors du perçage.

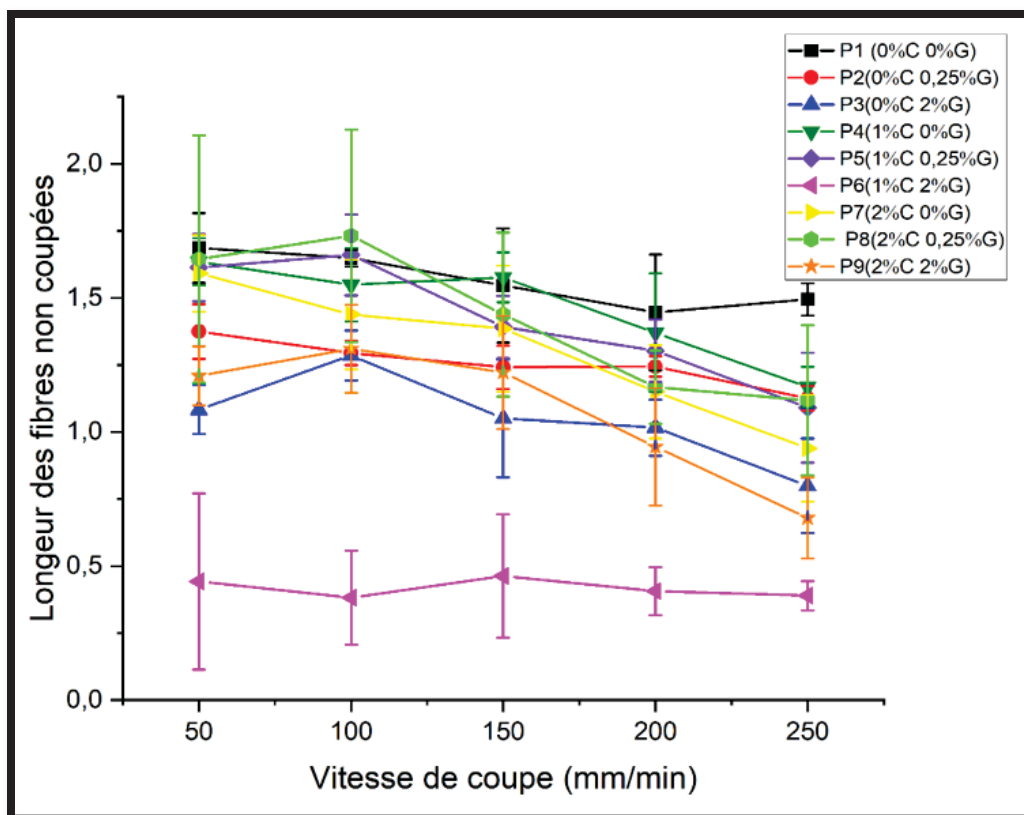


Figure 3.7 Variation de la longueur de fibres non coupées en fonction de la vitesse de coupe sans égard à la vitesse d'avance

L'analyse du graphique révèle que la longueur des fibres non coupées tend généralement à diminuer lorsque la vitesse de coupe augmente, et ce, quelle que soit la composition du composite. Cette évolution traduit une amélioration de l'efficacité de coupe aux vitesses les plus élevées. Parmi les différentes formulations, la plaque P1 (0 % cire, 0 % graphène) se distingue par des fibres non coupées sensiblement plus longues, en particulier lorsque la vitesse de coupe est plus élevée. À l'inverse, la plaque P3 (0% C, 2%G) composée sans cire mais enrichie en graphène montre une réduction progressive de la longueur des fibres non coupées à mesure que la vitesse de coupe augmente, soulignant l'effet bénéfique du graphène sur la performance du perçage, même en l'absence de cire.

Enfin, la plaque P6 (1 % cire, 2 % graphène) affiche systématiquement les longueurs de fibres non coupées les plus faibles sur toute la plage des vitesses testées, démontrant que la combinaison de cire et de graphène, surtout à des teneurs élevées, optimise la qualité de coupe et permet une section efficace des fibres durant le perçage. Ces observations confirment l'influence positive des additifs sur la maîtrise de la morphologie des fibres lors du perçage des composites.

3.8 Effet de la vitesse d'avance sur la longueur des fibres non coupées

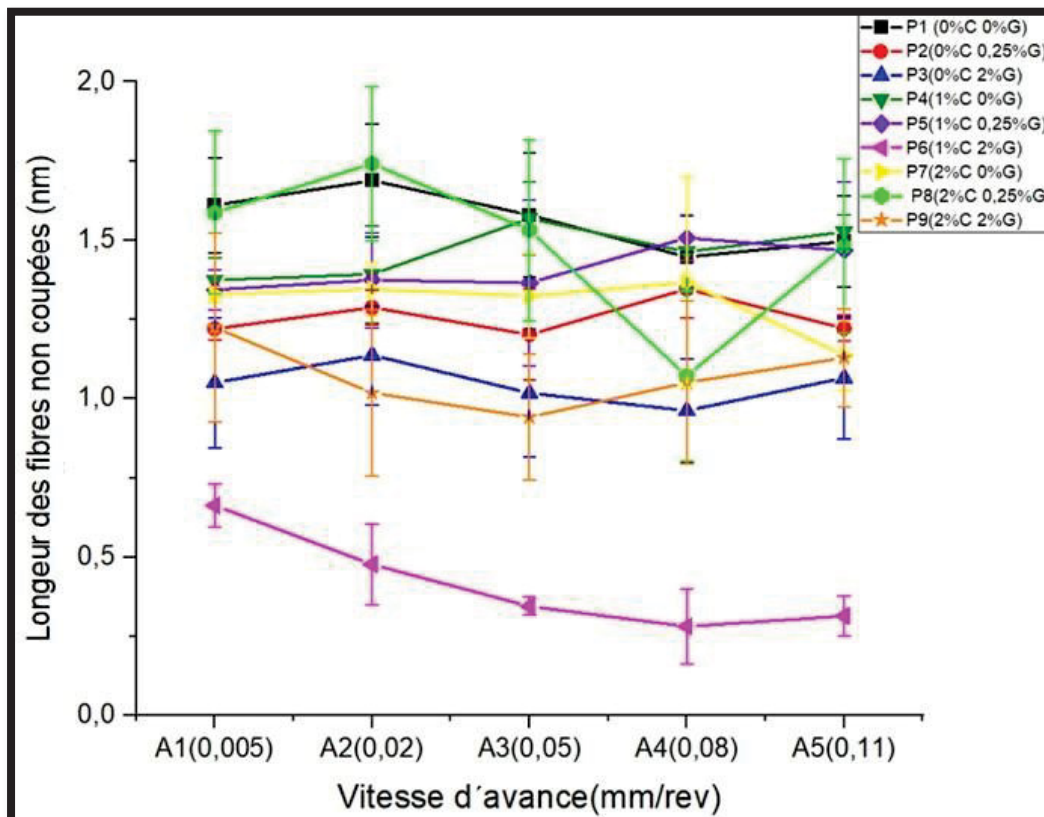


Figure 3.8 Influence de la vitesse d'avance sur la longueur des fibres non coupées sans égard à la vitesse de coupe

Le graphique de la figure 3.8 met en évidence l'évolution de la longueur des fibres non coupées en fonction de la vitesse d'avance pour différentes formulations de composites intégrant des

pourcentages variables de cire et de graphène. Globalement, la longueur moyenne des fibres non coupées varie peu selon la vitesse d'avance : pour la majorité des plaques testées, cet indicateur reste relativement stable, indépendamment de l'augmentation de la vitesse d'avance.

La composition du matériau apparaît cependant comme un facteur déterminant. La plaque P1 (0 % cire, 0 % graphène), soit sans additif, présente des fibres non coupées plus longues, en particulier aux vitesses d'avance les plus faibles, reflétant une moins bonne efficacité de coupe. À l'inverse, la formulation P6 (1 % cire, 2 % graphène) se distingue nettement en affichant, sur toute la plage testée, des fibres non coupées significativement plus courtes, ce qui témoigne d'une amélioration notable de la section des fibres lors de l'usinage. Par ailleurs, la présence de graphène, seul ou en association avec la cire (cas des plaques P3, P6, et P9), joue un rôle clé en permettant généralement de réduire la longueur des fibres non coupées par rapport aux plaques ne contenant pas cet additif.

En conclusion, si la vitesse d'avance influence peu la longueur des fibres non coupées pour la plupart des composites, l'optimisation de la composition en particulier l'incorporation de graphène et de cire, se révèle déterminante pour améliorer la qualité de coupe et limiter la présence de fibres non coupées lors du perçage.

3.9 Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface

La rugosité a été relevée uniquement à l'intérieur des trous de perçage. La figure 3.9 ci-dessous montre la rugosité de surface des trous en fonction de la vitesse de coupe pour différentes compositions de cire et de graphène. Les résultats sont respectivement compilés sans égard à la vitesse d'avance.

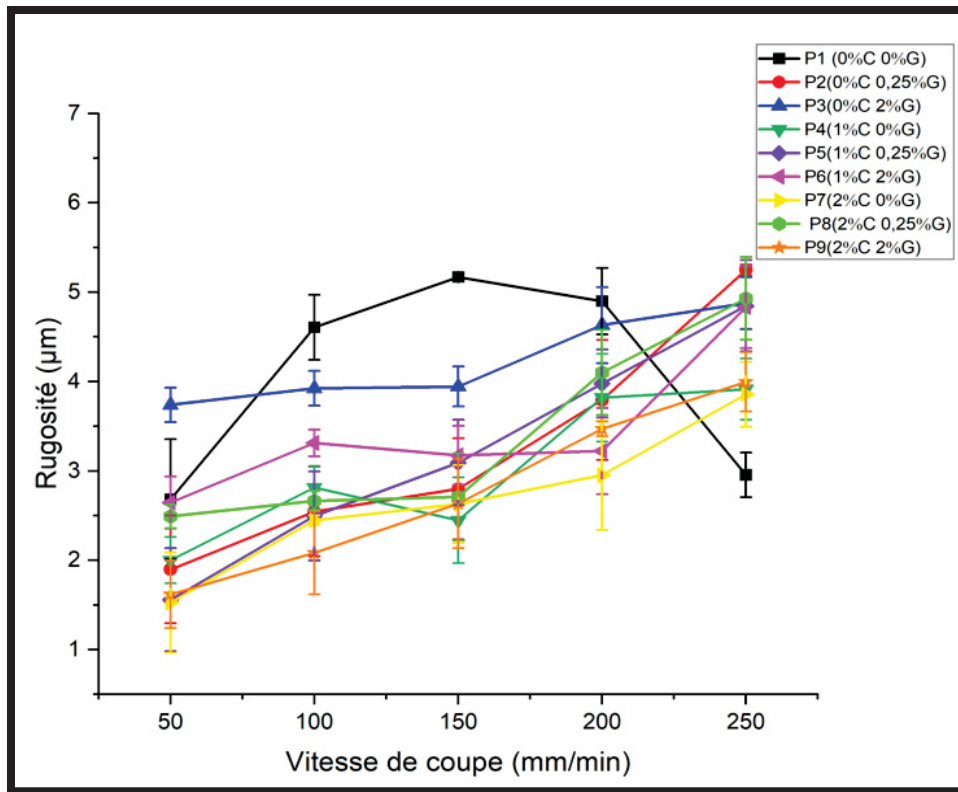


Figure 3.9 Évolution de la rugosité de surface en fonction des vitesses de coupe sans égard à la vitesse d'avance sans égard à la vitesse d'avance

L'analyse des résultats met en évidence que la rugosité de surface augmente généralement avec l'élévation de la vitesse de coupe, et que cet effet est d'autant plus marqué que l'on compare différentes compositions de plaques, plus spécifiquement, la plaque P1 (0 % cire, 0 % graphène), qui ne contient aucun additif, présente les valeurs de rugosité les plus élevées, notamment à des vitesses de coupe intermédiaires, ce qui révèle la sensibilité de ce matériau aux paramètres d'usinage. À l'inverse, les plaques enrichies en graphène en particulier P6 (1 % C, 2 % G) et P9 (2 % C, 2 % G) affichent globalement les rugosités les plus faibles sur l'ensemble des conditions testées. L'ajout de cire et de graphène contribue ainsi de manière synergique à réduire la rugosité de surface, tout également comme les plaques P2, P5 et P8, avec lesquelles l'amélioration par rapport à P1 est nette.

En comparaison, P3 (0 % C, 2 % G) et P4 (1 % C, 0 % G) présentent des valeurs de rugosité intermédiaires mais néanmoins supérieures à celles obtenues avec les formulations les plus abouties contenant les deux additifs. En conclusion, il apparaît clairement que l'introduction de graphène dans la matrice, combinée ou non à un ajout de cire, permet d'améliorer significativement la qualité d'état de surface, particulièrement à des vitesses de coupe élevées où l'effet devient le plus prononcé.

3.10 Effet de la vitesse d'avance sur la rugosité de surface

Le graphique de la figure 3.10 présente l'évolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance pour différentes compositions de matériaux composites incorporant des pourcentages variables de cire et de graphène. Les résultats sont compilés sans égard à la vitesse de coupe.

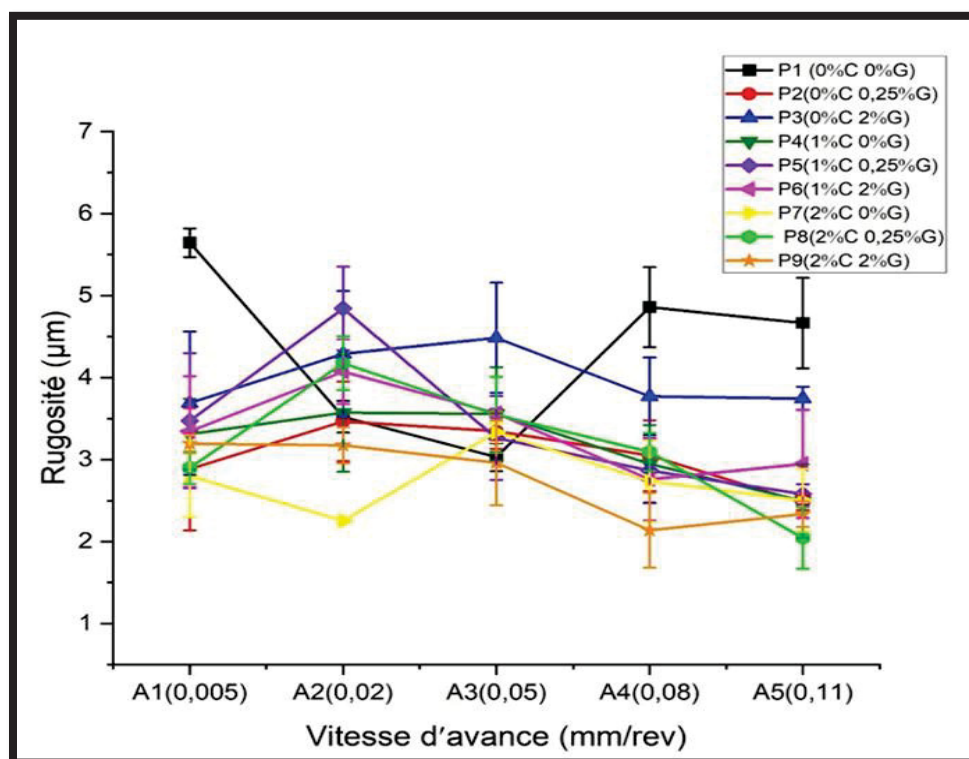


Figure 3.10 Évolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance sans égard à la vitesse de coupe

Globalement, la rugosité tend à varier avec la vitesse d'avance, mais une légère tendance à la diminution peut être observée aux avances plus élevées. Toutefois, l'effet du paramètre de composition semble être plus déterminant pour l'état de surface final que le seul changement du taux d'avance.

La plaque P1 (0 % cire, 0 % graphène), référence sans aucun additif, présente systématiquement les valeurs de rugosité les plus élevées, principalement à des vitesses d'avances plus élevées. Cela traduit une faible aptitude intrinsèque à générer une surface de qualité sans modification de formulation. L'ajout de graphène, seul ou en combinaison avec la cire, joue un rôle significatif dans l'amélioration de l'état de surface. Les plaques P3, P6, et P9, qui intègrent du graphène (avec ou sans cire), affichent des valeurs de rugosité plus faibles que celles des plaques ne contenant pas cet additif. En particulier, les plaques P9 (2 % C, 2 % G) se distinguent en présentant la rugosité la plus faible et la plus stable, quel que soit le niveau de vitesse d'avance, ce qui indique une meilleure adaptabilité aux conditions de coupe.

En conclusion, il ressort que l'ajout de graphène, en particulier à une concentration de 2 %, améliore sensiblement la qualité de surface, d'autant plus si cette addition est combinée à de la cire. Cette combinaison d'additifs contribue donc à stabiliser la rugosité de surface même lorsque les conditions d'usinage varient, offrant ainsi une solution efficace pour optimiser le perçage de matériaux composites.

3.11 Influence du graphène et de la cire sur la performance du perçage

3.11.1 Influence des additifs sur la force de coupe

Les figures 3.11 à 3.13 présentent une série de graphiques tridimensionnels montrant l'évolution des forces moyennes mesurées lors du perçage des plaques composites à fibres de carbone, en fonction de deux paramètres principaux : la vitesse de coupe (V_c , en mm/min) et la vitesse d'avance (V_f , en mm/rev). Les graphiques comparent les forces exercées lors du perçage de plaques composites renforcées de fibres de carbone selon différentes proportions de cire (C) et de graphène (G). Ils mettent clairement en évidence l'influence de la composition et des paramètres de perçage sur le comportement du perçage. On constate que les forces de coupe tendent à diminuer globalement avec l'augmentation de la vitesse de coupe, ce qui se traduit par un perçage facilité à haute vitesse.

Le graphique 3D de la figure 3.11 illustre l'évolution des forces moyennes enregistrées lors du perçage des plaques avec 0% de cire et pourcentage de graphène variable. On remarque que l'ajout de graphène dans les plaques réduit nettement les forces de perçage ; plus la proportion de graphène est élevée, plus la baisse de la force est marquée. La réduction des forces est particulièrement significative avec 2 % de graphène, surtout à grande vitesse, possiblement grâce à l'effet lubrifiant et renforçant du matériau. Ainsi, le graphène optimise le perçage en limitant les frottements et en facilitant la coupe, alors que les plaques sans additif restent les plus difficiles à usiner.

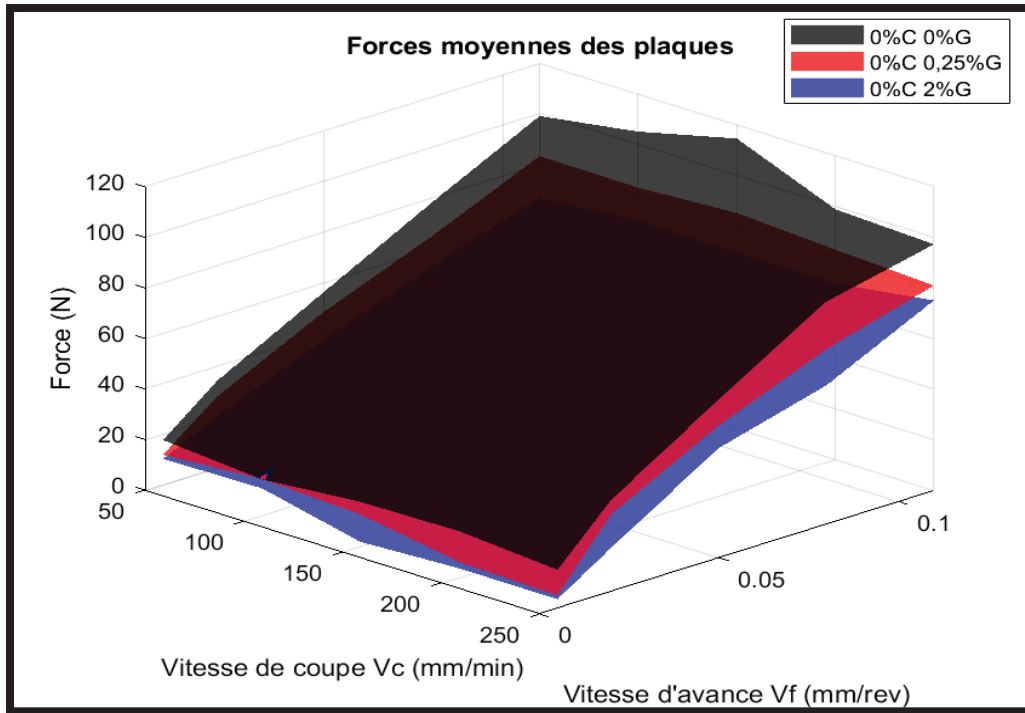


Figure 3.11 Effet combiné de 0 % de cire et du graphène sur les forces moyennes de perçage

Le graphique 3D de la figure 3.12 illustre l'évolution des forces moyennes enregistrées lors du perçage des plaques avec 1% de cire et pourcentage de graphène variable. La plaque de référence sans additif (0%C–0%G) génère les forces les plus élevées, ce qui traduit une plus grande résistance à l'usinage. En revanche, l'ajout de 1 % de cire (1%C–0%G) induit une réduction nette des efforts de coupe, confirmant l'effet lubrifiant de cet additif qui facilite le processus d'usinage. L'introduction combinée de cire et de faibles teneurs en graphène (1%C–0,25%G) renforce cette tendance en maintenant les forces à des niveaux bas, indiquant une synergie positive entre les deux additifs. Toutefois, à une teneur plus élevée en graphène (1%C–2%G), une remontée progressive des forces est observée, suggérant que l'excès de nanoparticules peut entraîner une augmentation de la rigidité ou une dispersion moins homogène, ce qui limite l'effet bénéfique initial.

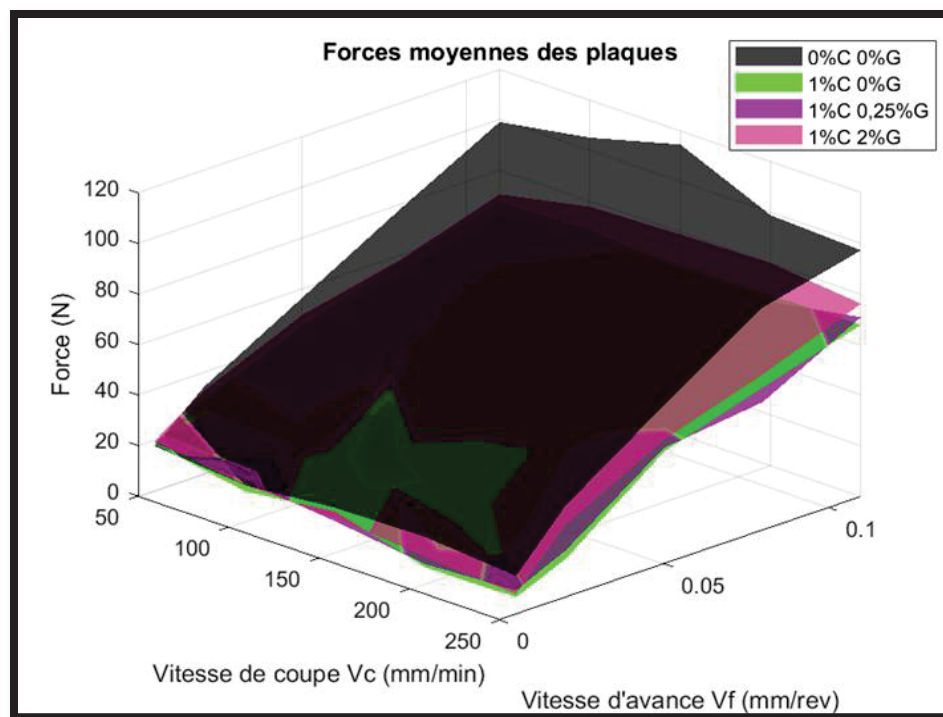


Figure 3.12 Effet combiné de 1 % de cire et du graphène sur les forces moyennes de perçage

Le graphique 3D de la figure 3.13 illustre l'évolution des forces moyennes enregistrées lors du perçage des plaques avec 2% de cire et pourcentage de graphène variable. La plaque de référence sans additifs (0%C–0%G) demeure la plus pénalisante, générant les forces de coupe les plus élevées. En revanche, l'introduction de 2 % de cire sans graphène (2%C–0%G) réduit significativement les efforts, confirmant le rôle lubrifiant et facilitateur de l'usinage avec cet additif. L'association de 2 % de cire avec de faibles teneurs en graphène (2%C–0,25%G) contribue à maintenir les forces à des niveaux bas, ce qui suggère une action synergique favorable à la réduction de la résistance au perçage. Toutefois, lorsque la concentration en graphène atteint 2% (2%C–2%G), une tendance à la remontée des forces est observée, traduisant probablement un effet de saturation ou une dispersion moins homogène de l'additif. Cela pourrait aussi être la source d'une rigidification du matériau pouvant ainsi limiter l'efficacité de l'additif.

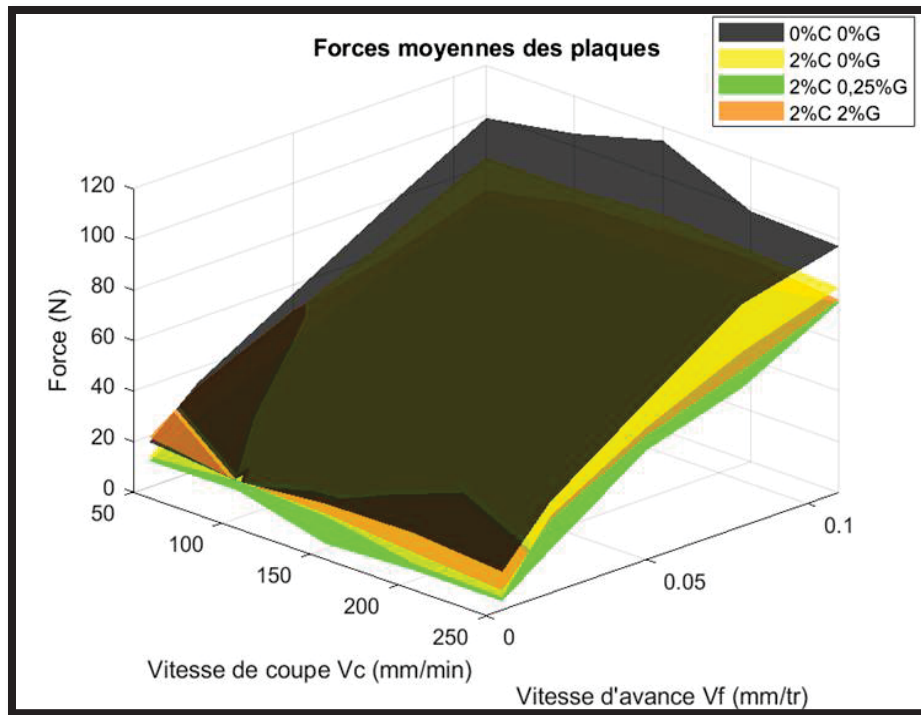


Figure 3.13 Effet combiné de 2 % de cire et du graphène sur les forces moyennes de perçage

3.11.2 Influence des additifs sur la température

Le graphique présenté à la figure 3.14 montre l'évolution des températures moyennes générées lors du perçage en fonction de la vitesse de coupe (V_c) et de la vitesse d'avance (V_f) pour différentes formulations de composites contenant uniquement du graphène.

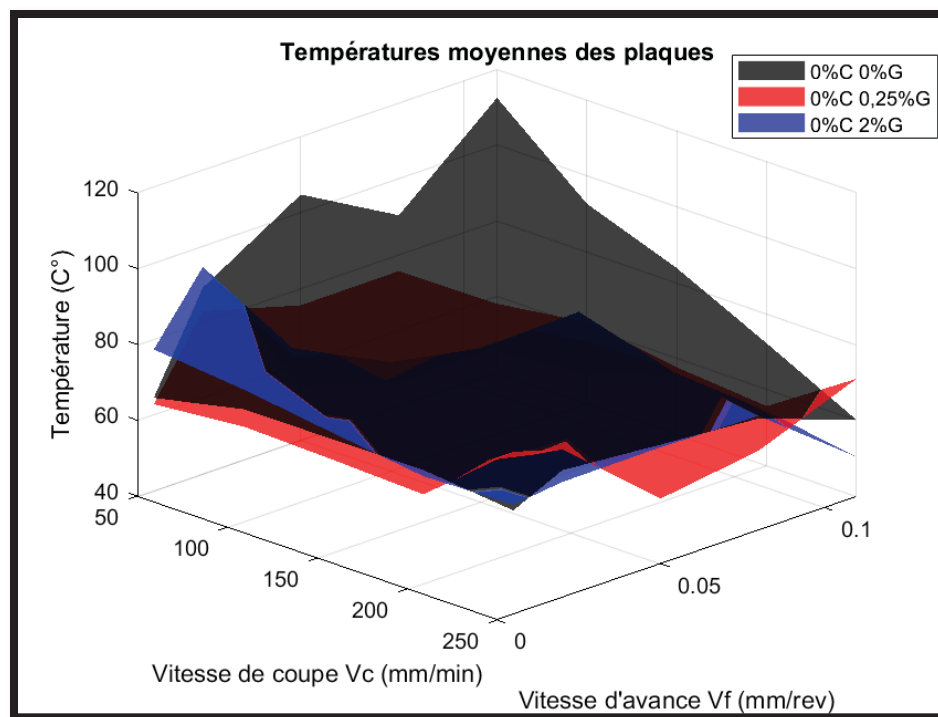


Figure 3.14 Influence du graphène sur les températures moyennes de perçage des composites CFRP

La plaque de référence sans additif (0%C–0%G) demeure la plus défavorable, atteignant les températures les plus élevées, en particulier aux vitesses de coupe élevées où un pic supérieur à 120 °C est observé. L'ajout de 0,25 % de graphène (0%C–0,25%G) permet une réduction sensible de la température, confirmant l'effet dissipateur thermique de cet additif, bien que l'atténuation reste modérée. En revanche, l'incorporation de 2 % de graphène (0%C–2%G) entraîne une baisse notable et régulière des températures pour l'ensemble des conditions de coupe, traduisant un rôle plus marqué du graphène dans la limitation de l'échauffement et dans la stabilisation thermique du processus. Ces résultats mettent en évidence que l'augmentation de la teneur en graphène améliore significativement le comportement thermique du perçage des CFRP.

Le graphique de la figure 3.15 présente l'évolution des températures moyennes enregistrées lors du perçage en fonction de la vitesse de coupe (V_c) et de la vitesse d'avance (V_f) pour différentes formulations de composites contenant 1 % de cire, avec ou sans ajout de graphène. La plaque témoin sans additif (0%C–0%G) reste la plus défavorable, générant des températures nettement plus élevées, notamment à vitesse de coupe élevée où un pic supérieur à 120 °C est observé.

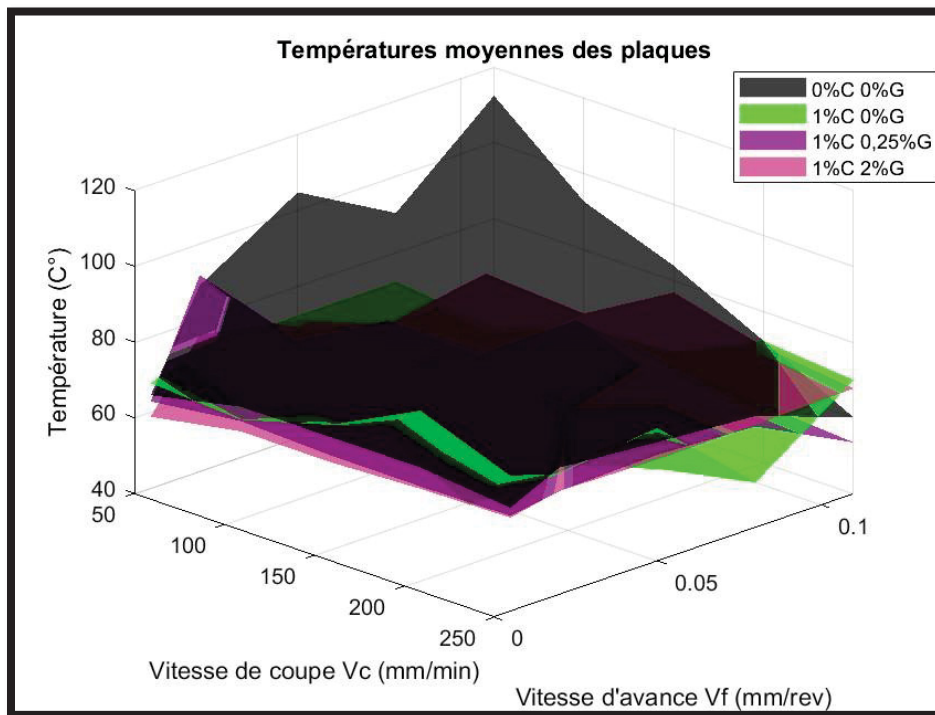


Figure 3.15 Effet combiné de 1 % de cire et du graphène sur les températures moyennes de perçage

On observe aussi que l'introduction de 1 % de cire seule (1%C–0%G) entraîne une réduction notable de la température, confirmant l'effet lubrifiant de la cire qui limite les frottements et la génération de chaleur pendant le perçage. L'association de 1 % de cire avec une faible teneur en graphène (1%C–0,25%G) contribue à stabiliser davantage les températures, traduisant un effet synergique bénéfique entre les deux additifs. Enfin, l'ajout combiné de 1 % de cire et de

2 % de graphène (1%C–2%G) permet d'atteindre les températures les plus basses et homogènes, démontrant une efficacité accrue en termes de dissipation thermique et de maîtrise des échauffements. Cette configuration apparaît ainsi comme la plus performante pour réduire les risques de délaminage, de dégradation thermique et d'usure prématurée des outils lors du perçage des composites CFRP. Finalement, le graphique de la figure 3.16 illustre l'évolution des températures moyennes enregistrées lors du perçage en fonction de la vitesse de coupe (V_c) et de la vitesse d'avance (V_f) pour des composites contenant 2 % de cire, avec ou sans ajout de graphène. Tout comme précédemment, la plaque de référence sans additif (0%C–0%G) génère les températures les plus élevées, confirmant son comportement défavorable face à l'échauffement induit par l'usinage.

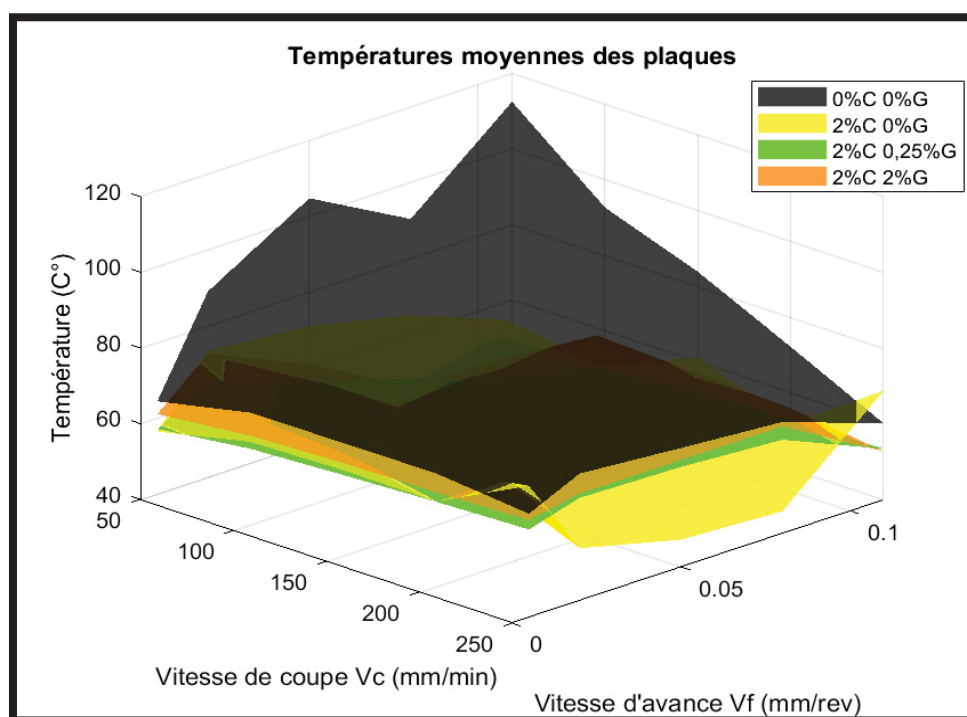


Figure 3.16 Effet combiné de 2 % de cire et du graphène sur les températures moyennes de perçage

L'ajout de 2 % de cire seule (2%C–0%G) réduit sensiblement la température, traduisant l'effet lubrifiant de la cire qui diminue les frottements et améliore l'évacuation de la chaleur.

L'association de 2 % de cire avec 0,25 % de graphène (2%C–0,25%G) accentue cette réduction, indiquant une interaction bénéfique entre les deux additifs dans la maîtrise thermique du perçage. Enfin, la combinaison de 2 % de cire et de 2 % de graphène (2%C–2%G) maintient les températures parmi les plus basses et les plus stables, suggérant un effet synergique marqué. Cette formulation limite efficacement les pics thermiques, ce qui contribue à réduire les risques de délaminage, de dégradation de la matrice et d'usure prématurée de l'outil.

3.11.3 Effet des additifs sur la rugosité

Le graphe de la figure 3.17 illustre l'évolution de la rugosité moyenne des surfaces percées en fonction de la vitesse de coupe (V_c) et de la vitesse d'avance (V_f) pour différentes formulations de composites contenant uniquement du graphène. La plaque témoin sans additif (0%C–0%G) présente globalement une rugosité plus élevée, traduisant une qualité d'usinage moins favorable.

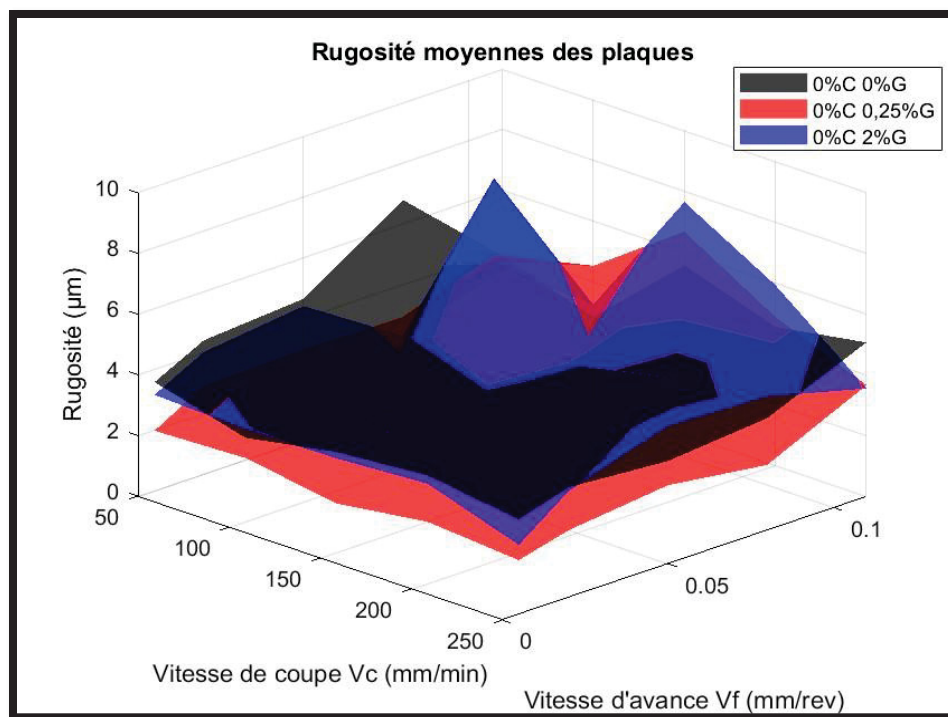


Figure 3.17 Influence du pourcentage de graphène sur la rugosité moyenne des plaques composites en fonction des paramètres de perçage

La plaque témoin (noir) présente des rugosités globalement plus élevées, témoignant d'une qualité de surface moins favorable en l'absence d'additif. L'ajout de 0,25 % de graphène (rouge) entraîne une réduction marquée et une stabilisation de la rugosité, confirmant l'effet bénéfique d'une faible teneur en graphène pour améliorer la qualité de surface et la régularité des résultats. En revanche, une concentration plus importante (2 % de graphène, bleu) conduit à une hausse de la rugosité aux vitesses de coupe et d'avance élevées, supérieure aux valeurs du témoin, indiquant que des teneurs trop élevées peuvent dégrader la qualité de surface.

La figure 3.18 présente l'évolution de la rugosité moyenne des surfaces usinées en fonction de la vitesse de coupe (V_c) et de la vitesse d'avance (V_f), pour différentes compositions de composites contenant 1 % de cire, avec ou sans incorporation de graphène. Il apparaît que la plaque témoin (0 %C – 0 %G) affiche des valeurs de rugosité relativement plus élevées, traduisant une qualité de surface moins satisfaisante en l'absence d'additifs.

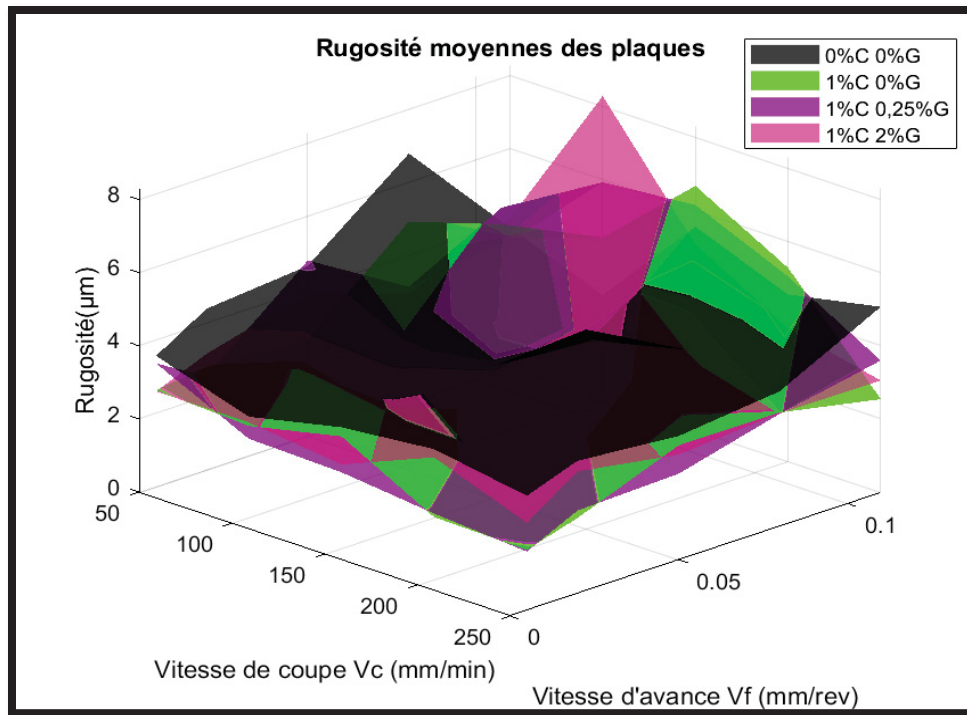


Figure 3.18 Effet combiné de la cire et du graphène sur la rugosité moyenne des plaques composites en fonction des vitesses de coupe et d'avance

L'ajout de 1 % de cire seule (1%C–0%G, vert) améliore légèrement la rugosité, ce qui confirme l'effet lubrifiant de la cire qui réduit l'échauffement et favorise l'évacuation des copeaux. L'association 1%C–0,25%G (rose) montre la meilleure performance, avec une rugosité globalement réduite et plus stable, traduisant une synergie positive entre la cire et une faible teneur en graphène.

En revanche, avec 1%C–2%G (violet), la rugosité augmente à nouveau, atteignant parfois des valeurs supérieures à celles du témoin. Cela suggère qu'un excès de graphène perturbe la matrice et dégrade la qualité de surface, malgré la présence de cire.

La figure 3.19 met en évidence l'évolution de la rugosité moyenne des surfaces usinées en fonction de la vitesse de coupe (V_c) et de la vitesse d'avance (V_f) pour des composites intégrant 2 % de cire, avec ou sans incorporation de graphène. La plaque de référence dépourvue d'additifs (0 %C – 0 %G) se distingue par des valeurs de rugosité plus élevées, révélant une qualité de surface moins optimale.

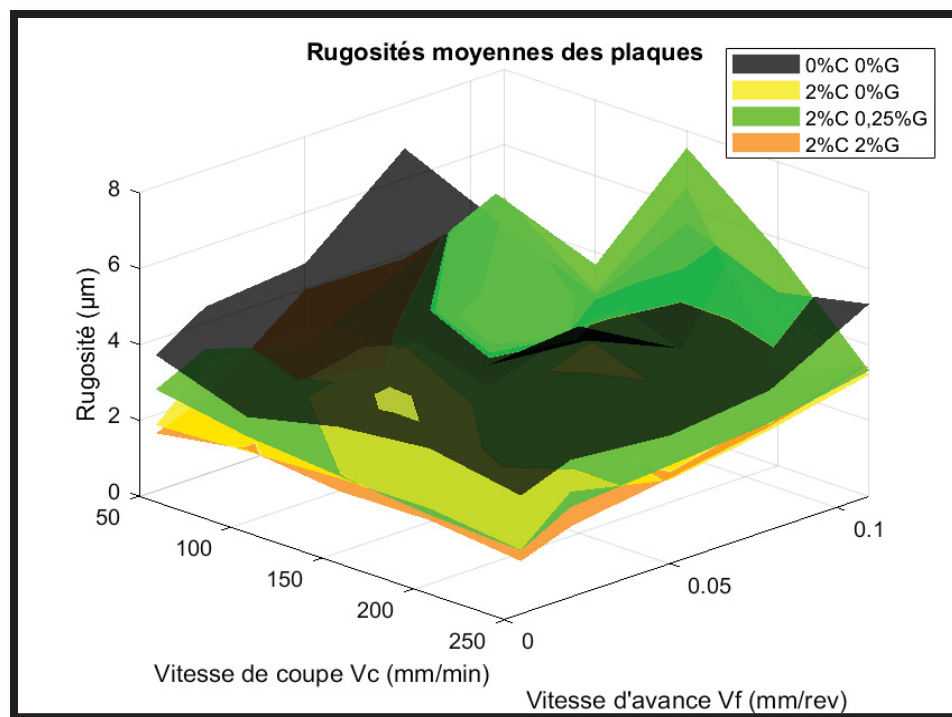


Figure 3.19 Influence d'un taux de 2 % de cire et de l'ajout de graphène sur la rugosité moyenne des plaques composites en fonction des vitesses de coupe et d'avance

L'absence d'additifs (0%C–0%G, noir) se traduit par les rugosités les plus élevées, témoignant d'une qualité de surface médiocre en l'absence de lubrification ou de modification de matrice. L'ajout de 2% de cire seule (2%C–0%G, jaune) permet de diminuer la rugosité, confirmant ainsi l'effet lubrifiant de la cire qui réduit l'échauffement et favorise une meilleure évacuation des copeaux. L'association 2%C–2%G (orange) offre la meilleure performance globale, avec des valeurs de rugosité plus basses et plus stables selon les paramètres d'usinage, traduisant une synergie positive entre la cire et une faible quantité de graphène.

En revanche, la formulation 2%C–0,25%G (orange) présente une rugosité élevée, atteignant parfois des valeurs supérieures à celles du témoin. Cela laisse supposer qu'une concentration excessive en graphène peut perturber la matrice composite et détériorer la qualité de surface, malgré la présence de cire. Cette observation met en évidence la nécessité d'optimiser la teneur en additifs afin de garantir une amélioration effective de la finition des composites.

Le tableau 3.1 permet de visualiser, de manière synthétique et objective, les progrès réalisés pour chaque formulation par rapport à la référence, en s'appuyant sur des données quantitatives.

Tableau 3.1 Améliorations (%) par rapport au composite témoin

Paramètres mesurés\Amélioration	0%C 0%G	0%C 0,25%G	0%C 2%G	1%C 0%G	1%C 0,25%G	1%C 2%G	2%C 0%G	2%C 0,25%G	2%C 2%G
Force du perçage (N)	60,9	20%	36%	33%	33%	26%	33%	32%	25%
Température de coupe (C°)	79,1	14%	17%	19%	16%	13%	21%	22%	20%
Rugosité (µm)	4	25%	15%	20%	20%	15%	30%	20%	30%
Délaminage	1,4	0%	7%	7%	0%	21%	14%	14%	14%
Longueur de fibre non coupées	1,6	19%	31%	6%	13%	75%	19%	13%	31%

Le tableau met en évidence que l'ajout de cire et de graphène dans les composites CFRP améliore significativement leur usinabilité par rapport au témoin. En effet, la force de perçage et la température de coupe diminuent nettement, atteignant respectivement des réductions maximales d'environ 36 % et 20 % selon la formulation. La rugosité de surface est également améliorée, passant de 4 µm pour le témoin à 2,8 µm pour certains échantillons, traduisant une meilleure qualité de perçage. Le graphène à 2 % se révèle particulièrement efficace pour réduire les efforts, tandis que la cire à 2 % combinée à une faible dose de graphène optimise la dissipation thermique. En ce qui concerne le délaminage, la combinaison 1%C–2%G s'avère la plus performante, avec une réduction de plus de 21 %, ce qui souligne l'apport synergique du graphène et de la cire pour préserver l'intégrité des stratifiés. Enfin, la longueur des fibres non coupées est considérablement réduite de 75 % avec la même formulation (1%C–2%G), révélant un effet optimal de la synergie cire graphène sur ce paramètre critique.

3.12 Analyse comparative des plaques en fonction des teneurs en cire et en graphène

3.12.1 Force de coupe

Le graphique de la figure 3.20 présente un histogramme qui compare la force moyenne requise pour le perçage des composites en fonction des différentes concentrations d'additifs indépendamment des paramètres de coupe. Il met en évidence les variations d'effort mécanique

selon la composition ou la structure des plaques, permettant ainsi d'identifier quelles configurations exigent le plus ou le moins de force lors de l'usinage.

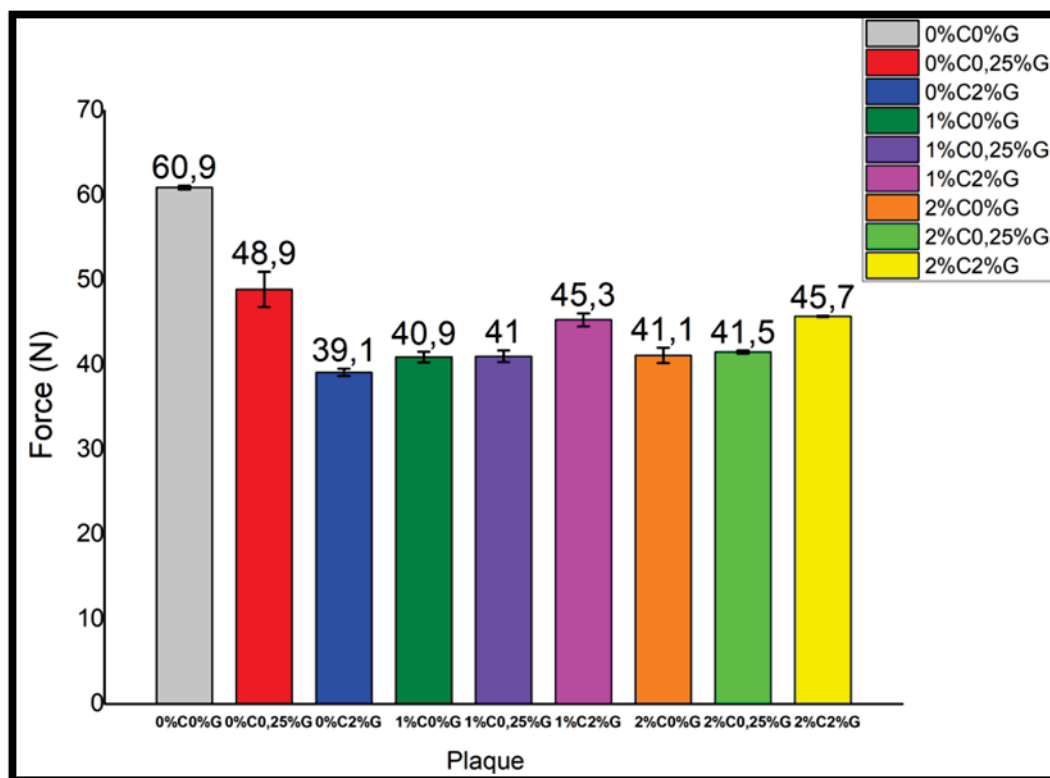


Figure 3.20 Effet des pourcentages de cire et de graphène sur la force moyenne

Le graphique met en évidence l'évolution de la force nécessaire au perçage en fonction des pourcentages de graphène (G) et de cire (C) pour chaque type de plaque composite. On observe que la force moyenne la plus élevée est enregistrée pour la plaque ne contenant ni cire ni graphène (0 % C, 0 % G), atteignant environ 61 N. L'intégration progressive de cire et de graphène dans la matrice du composite conduit à une diminution notable de l'effort nécessaire, témoignant de l'effet lubrifiant et de la capacité de dissipation thermique de ces additifs. Le niveau de force le plus bas est relevé pour la configuration avec 0 % de cire et 0,25 % de graphène, où la force moyenne chute à 39 N. Ces résultats illustrent que l'ajout de graphène, même en faible concentration, ainsi que l'incorporation de cire, améliorent significativement l'usinabilité des composites en réduisant les contraintes mécaniques appliquées lors du perçage. Ce constat est en accord avec les données de la littérature, où plusieurs études

rapportent que l'intégration d'additifs lubrifiants ou nanostructurés contribue à diminuer les efforts de coupe et à améliorer la qualité d'usinage des composites à fibres de carbone (El-Ghaoui et al., 2019; Mathieu et al., 2022).

3.12.2 Température de coupe

La figure 3.21 illustre la variation de la température de coupe moyenne (en °C) mesurée lors du perçage des différentes plaques composites, en fonction des compositions en cire (C) et en graphène (G) sans tenir compte des paramètres de coupe. Chaque barre colorée de l'histogramme représente une configuration spécifique de la plaque, indiquée précisément sur l'axe des abscisses.

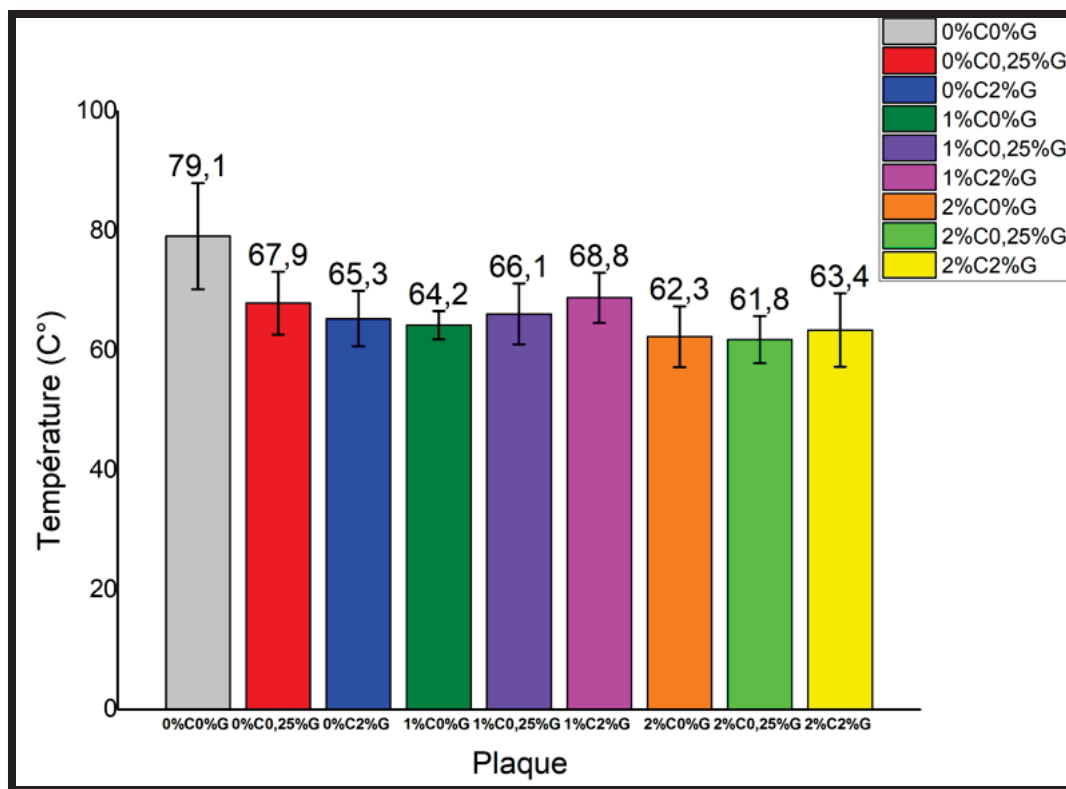


Figure 3.21 Effet des pourcentages de cire et de graphène sur la température moyenne

Le graphique met en évidence l'évolution de la température moyenne de coupe en fonction des pourcentages de cire (C) et de graphène (G) pour chaque configuration de plaque composite.

On constate que la plaque sans cire ni graphène (0 % C, 0 % G) présente la température moyenne la plus élevée, atteignant 79 °C. Ce résultat traduit une dissipation thermique moins efficace dans la matrice pure, sans additifs.

L'introduction de cire et/ou de graphène dans la matrice a un effet bénéfique, se traduisant par une réduction progressive de la température moyenne mesurée lors du perçage. Cette tendance est particulièrement marquée pour la plaque associant 2 % de cire à 0,25 % de graphène, qui affiche une température moyenne parmi les plus basses, soit environ 62 °C. Ce résultat met en avant l'impact positif de la combinaison des deux additifs.

3.12.3 Rugosité de surface

La figure 3.22 illustre l'évolution de la rugosité de surface en fonction de la teneur en cire (C) et en graphène (G) pour différentes configurations de plaques composites sans tenir compte des paramètres de coupe. Les valeurs les plus élevées de rugosité sont enregistrées pour la plaque sans cire ni graphène (0 % C, 0 % G) alors que la plupart des autres concentrations mènent à des rugosité similaires variant entre 3.2 et 3.4 μm . L'ajout de cire et de graphène semblent bénéfique pour réduire progressivement la rugosité. Cette tendance est particulièrement marquée pour la plaque contenant 2 % de cire et 2 % de graphène, qui affiche la valeur la plus faible de rugosité, soit 2,8 μm . Ce résultat souligne l'effet complémentaire des deux additifs, dont l'association contribue à améliorer les conditions d'usinage, à limiter l'endommagement des bords du trou, et à optimiser la qualité finale de la surface usinée.

En résumé, cette analyse confirme que l'intégration contrôlée de cire et de graphène dans la matrice du composite permet d'améliorer la qualité de surface après perçage, en atténuant les effets d'usure et de friction.. Ce constat rejoint les conclusions de plusieurs travaux antérieurs, qui mettent également en évidence l'efficacité de ces additifs pour limiter les contraintes de coupe et préserver l'intégrité des surfaces usinées(El-Ghaoui et al., 2019).

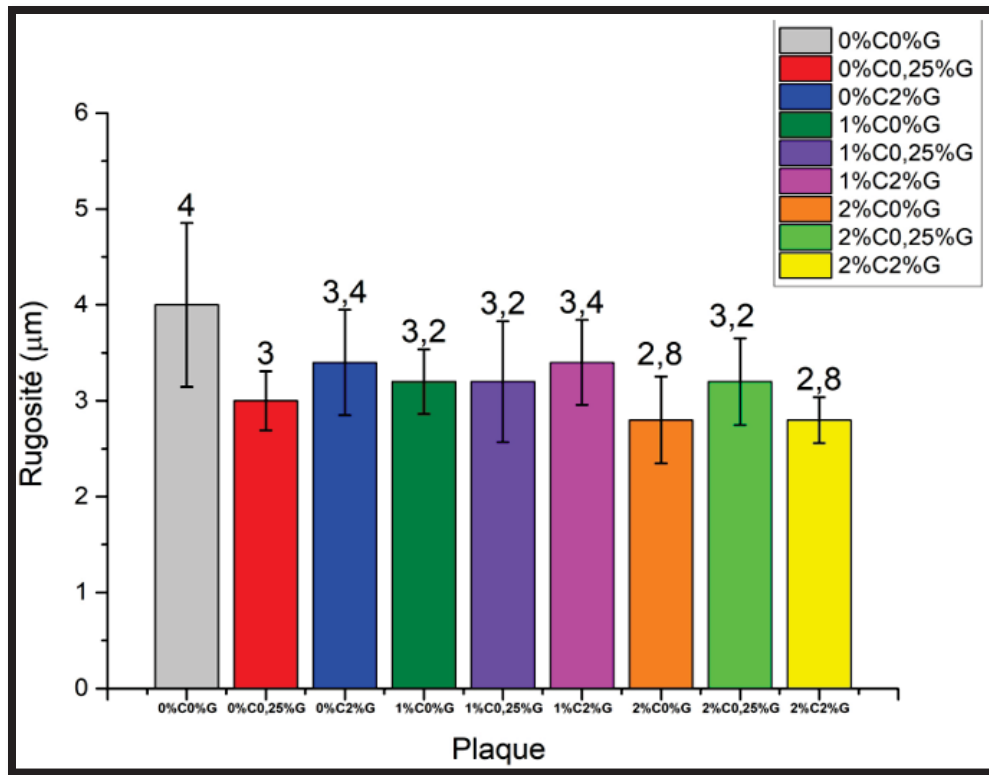


Figure 3.22 Effet des pourcentages de cire et de graphène sur la rugosité moyenne

3.12.4 Facteur de délaminage

La figure 3.23 présente l'évolution du facteur de délaminage moyen (Fd) en fonction des teneurs en cire (C) et en graphène (G) pour les différentes plaques composites sans tenir compte des paramètres de coupe. Les valeurs les plus élevées de Fd sont observées pour la plaque témoin 0 %C–0 %G et pour 1 %C–0,25 %G, toutes deux à $\approx 1,4$ indiquant une sensibilité accrue au délaminage en l'absence d'additifs efficaces ou avec une faible teneur en graphène.

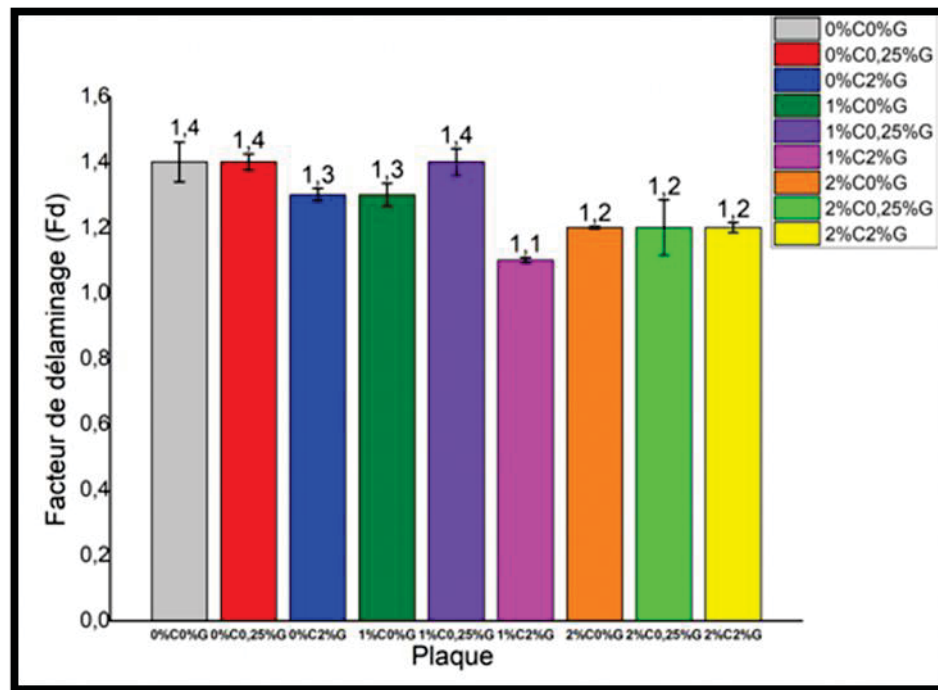


Figure 3.23 Influence de la cire et du graphène sur le délaminage (Fd) des plaques CFRP

L'introduction isolée d'un seul additif réduit modérément Fd à $\approx 1,3$ (1 %C–0 %G) et (0 %C–2 %G), tandis que (0 %C–0,25 %G) n'apporte pas d'amélioration notable.

À l'inverse, porter la cire à 2 % conduit à une baisse régulière du délaminage, avec $Fd \approx 1,2$ quelle que soit la teneur en graphène (0, 0,25 ou 2 %). La réduction la plus marquée est obtenue avec la combinaison 1 %C–2 %G, qui atteint la valeur minimale $Fd \approx 1,1$.

Ces résultats suggèrent un effet complémentaire : la cire agit par lubrification/limitation de l'échauffement durant le perçage, tandis que le graphène contribue au renforcement interlaminaire et freine la propagation du délaminage. En synthèse, l'intégrité interlaminaire est optimisée par 1 % de cire + 2 % de graphène, tandis que 2 % de cire seule constitue une alternative robuste pour réduire le délaminage.

3.12.5 Longueur des fibres non coupées

La figure 3.24 présente l'évolution de la longueur moyenne des fibres non coupées (μm) en fonction des teneurs en cire (C) et en graphène (G). Les valeurs les plus élevées sont relevées

pour la référence 0%C–0%G ($\approx 1,6 \mu\text{m}$) et pour 1%C seul ($\approx 1,5 \mu\text{m}$), traduisant un arrachement fibreux plus marqué.

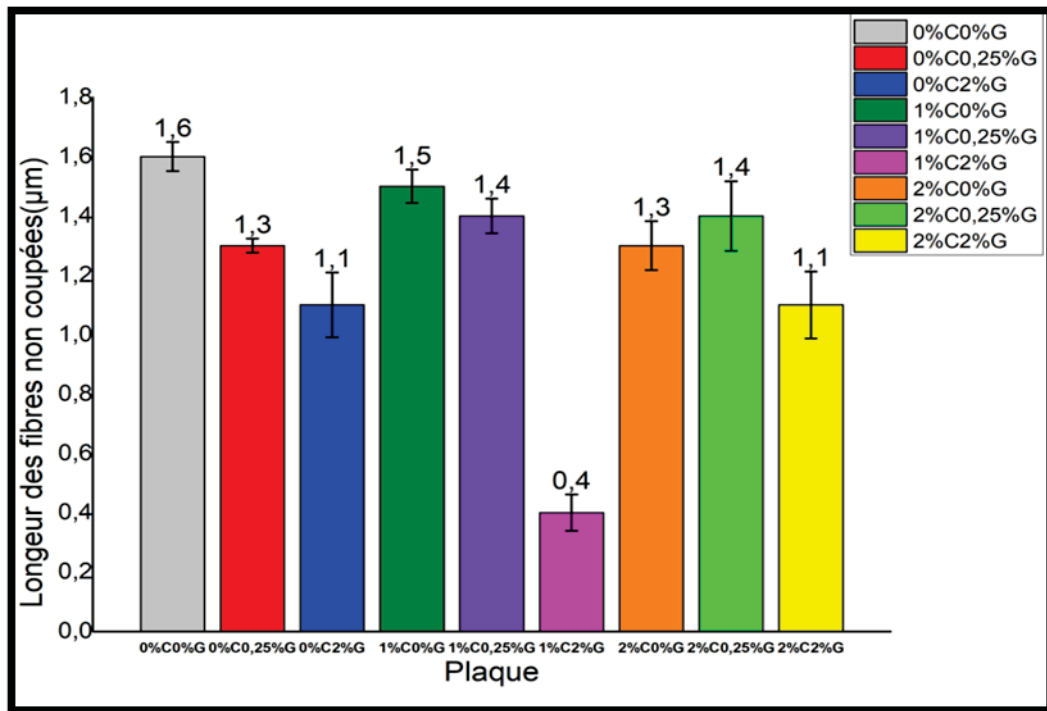


Figure 3.24 Influence de la cire et du graphène sur la longueur des fibres non coupées après perçage des plaques CFRP

L'ajout d'un seul additif réduit modérément cette longueur. Les concentrations 0%C–0,25%G et 2%C–0%G se situent autour de $1,3 \mu\text{m}$, tandis que celles de 1%C–0,25%G et 2%C–0,25%G restent près de $1,4 \mu\text{m}$. Les diminutions les plus nettes apparaissent avec une concentration de 2 % de graphène (0%C–2%G) et (2%C–2%G) qui atteignent environ $1,1 \mu\text{m}$, et surtout la combinaison de 1%C–2%G qui produit une longueur moyenne minimale à environ $0,4 \mu\text{m}$.

Ceci est un signe d'une coupe plus franche avec des bords mieux définis. Ces résultats confirment un effet complémentaire : la cire améliore la lubrification et la dissipation thermique (moins de contraintes et d'arrachements), tandis que le graphène renforce l'interface fibre–matrice et limite l'extraction des fibres. Les barres d'erreur, globalement courtes, indiquent une bonne répétabilité. En conclusion, l'association 1%C–2%G optimise l'intégrité

de surface, et 0%C–2%G ou 2%C–2%G constituent des alternatives performantes pour réduire la longueur des fibres non coupées.

3.13 Analyse de l'ajout des additifs de cire et de graphène sur le perçage des CFRP

Lors du perçage des composites à fibres de carbone (CFRP), la majeure partie de la chaleur générée provient du frottement entre l'outil et la matière, pouvant représenter plus de 70 % de la température totale développée à l'interface. L'ajout de graphène joue le rôle de nano-lubrifiant solide : la facilité de glissement de ses feuillets diminue le coefficient de frottement à l'interface outil/composite, ce qui réduit à la fois les forces de coupe et la chaleur générée. En outre, sa très forte conductivité thermique améliore l'évacuation de la chaleur dans l'épaisseur du stratifié et hors de la zone de coupe. Cette meilleure gestion thermique limite les concentrations locales de température au contact outil/copeau et diminue les risques de dégradation de la résine ou de la perte de rigidité pendant l'usinage.

La cire, pour sa part, agit comme un lubrifiant de surface largement employé dans les matrices polymères : ses particules migrant vers la surface forment un film mince qui réduit le frottement ainsi que l'adhésion entre l'outil, les copeaux et la matrice.

L'amélioration de l'usinage des CFRP par la cire et le graphène repose donc sur un compromis d'additifs afin de réduire la friction, la température et les efforts de coupe, mais pas au point de fragiliser la structure ou de dégrader la dispersion. La détermination de cette fenêtre optimale de concentrations et des conditions de coupe associées constitue aujourd'hui un axe majeur de recherche. La réduction du frottement grâce au graphène et la cire diminuent les efforts de coupe, ce qui adoucit le mécanisme de perçage et améliore l'intégrité de surface (rugosité et délamination). En abaissant la force de perçage et en renforçant la cohésion inter laminaire, ces additifs diminuent aussi le délaminage d'entrée et surtout de sortie en perçage.

CONCLUSION

L'usinage des composites CFRP reste un défi majeur, marqué par des forces de coupe élevées, une usure rapide des outils et l'apparition de défauts tels que le délaminage ou une mauvaise qualité de surface. Dans ce cadre, l'étude avait pour objectif d'évaluer l'effet de l'incorporation de microparticules de cire et de graphène dans la matrice époxy, en supposant que leurs propriétés lubrifiantes et thermo conductrices puissent réduire les contraintes mécaniques et thermiques générées au cours du perçage.

Les résultats confirment que l'ajout de cire et de graphène améliore nettement la qualité d'usinage : la force de perçage, la rugosité, le délaminage et la température de coupe diminuent, ce qui accroît la fiabilité et la qualité des assemblages. Si la force de perçage reste relativement stable avec la vitesse de coupe, elle croît avec la vitesse d'avance, paramètre qui s'avère déterminant. Les formulations intégrant 2 % de cire et entre 0,25 % et 2 % de graphène se distinguent par les meilleurs résultats, en limitant simultanément les forces, la rugosité et l'élévation thermique. Par ailleurs, les plaques sans additif atteignent des températures de 80–90 °C, alors que celles enrichies affichent des valeurs plus basses et stables. L'ajout de 2 % de graphène contribue particulièrement à réduire le délaminage et la longueur de fibres non coupées, en synergie avec la cire, surtout à vitesse d'avance élevée. La combinaison 2 % cire + 2 % graphène offre ainsi la meilleure qualité de surface et confirme l'efficacité de ces additifs pour optimiser l'usinabilité des CFRP. La combinaison 1 % cire + 2 % graphène quant à elle, semble représenter un excellent compromis pour améliorer l'ensemble des réponses, particulièrement en ce qui concerne la longueur de fibres non coupées et le délaminage, critères de qualité essentiels en usinage des composites.

Ces observations soulignent l'intérêt de recourir à des additifs tels que la cire et le graphène pour l'usinage de composites à haute valeur ajoutée, en particulier dans le secteur aéronautique, où la qualité de finition et la sécurité des assemblages sont cruciales. L'optimisation conjointe de la formulation et des paramètres de coupe permet non seulement de limiter les défauts, mais aussi d'améliorer la durabilité et la performance des pièces usinées.

Cette démarche ouvre des perspectives prometteuses pour l'intégration de nouveaux additifs et le perfectionnement des procédés, afin de développer des composites toujours plus fiables et adaptés aux exigences industrielles futures.

RECOMMANDATIONS

Ce travail de recherche s'inscrit dans une démarche innovante visant à optimiser l'usinabilité des composites à matrice polymère renforcée de fibres de carbone (CFRP) grâce à l'intégration de cire et graphène comme additif fonctionnel. Les résultats encourageants obtenus témoignent du potentiel significatif de cette stratégie pour améliorer la qualité de perçage et la performance globale des matériaux. Cependant, afin de valider durablement l'efficacité et la pertinence de ces approches, il apparaît nécessaire d'approfondir les investigations menées. À ce titre, plusieurs axes de recherche complémentaires peuvent être envisagés :

- Privilégier l'incorporation d'additifs, en particulier la combinaison de cire (2 %) et de graphène (0,25–2 %), dans la matrice époxy. Cette formulation a démontré une nette réduction des forces de coupe, de la température, de la rugosité et du délaminage lors du perçage,
- Ajuster les paramètres d'usinage en faveur de vitesses de coupe modérées à élevées qui n'augmentent pas la force de perçage mais contribuent à réduire la longueur des fibres non coupées. Parallèlement, une vitesse d'avance permet de minimiser le délaminage et la température sans dégrader la qualité de surface,
- Optimiser le choix de la formulation en fonction des exigences applicatives : par exemple, maximiser le taux de graphène si la minimisation du délaminage est cruciale, ou celui de la cire pour abaisser au mieux la température et faciliter l'évacuation des copeaux,
- Analyser l'usure des forets de perçage afin d'étudier la dégradation progressive de leurs arêtes de coupe, et d'identifier les mécanismes en jeu et leur impact sur la qualité d'usinage,
- Poursuivre les recherches sur l'effet d'autres additifs présentant des synergies et sur l'influence croisée des paramètres de coupe sur la qualité d'usinage,
- Poursuivre les recherches en ce qui concerne le choix d'outils. Une comparaison des différentes technologies (carbure, CVD et PCD) en regard de la durée de vie et des pourcentages d'additifs serait intéressante.

Finalement, il serait intéressant d'évaluer la reproductibilité des résultats à l'échelle industrielle et tester l'impact sur les propriétés mécaniques à long terme des structures composites fabriquées avec ces formulations optimisée

ANNEXE I

Code MATLAB pour tracer un graphe de trois surfaces différentes

```
% Définir les vecteurs de vitesse de coupe (Vc) et d'avance (Vf)
Vc = [50, 100, 150, 200, 250];
Vf = [0.005, 0.02, 0.05, 0.08, 0.11];

% Forces pour chaque plaque
Fz_P1 = [17.57333333, 14.33, 17.62333333, 18.30666667, 15.236;
        34.23666667, 30.71, 36.30666667, 37.59, 36.29333333;
        56.28333333, 61.78, 67.48, 67.37, 62.66033333;
        78.22666667, 84.04, 91.69666667, 92.40733333, 87.93666667;
        99.012, 105.09, 114.6133333, 98.86666667, 97.26333333];

Fz_P2 = [13.6123, 15.23676667, 14.1148, 7.405, 8.126666667;
        29.36493333, 25.85673333, 27.77045, 27.04136667, 17.156;
        44.07843333, 42.48213333, 45.34733333, 44.22963333, 47.35146667;
        55.4557, 56.1493, 50.6184, 55.7717, 55.62613333;
        66.33593333, 69.08346667, 69.73456667, 62.11276667, 71.0463];

Fz_P3 = [15.44353333, 13.91666667, 6.108, 6.8337, 7.7397;
        28.23963333, 29.45646667, 26.8916, 27.4613, 21.17853333;
        42.30833333, 46.95586667, 45.40193333, 44.99386667, 44.93123333;
        59.31353333, 58.29776667, 56.53536667, 57.12666667, 61.63;
        68.53166667, 67.4908, 69.84956667, 68.01666667, 62.26886667];

Fz_P4 = [20.21666667, 16.62713333, 16.51736667, 8.374433333, 10.31236667;
        31.79856667, 28.88136667, 31.22823333, 31.69006667, 24.3368;
```

```

48.94316667, 47.7611, 48.61676667, 51.98233333, 48.74;
62.23516667, 64.6943, 66.391, 63.17066667, 56.87513333;
69.66353333, 68.62463333, 74.8638, 78.22666667, 72.71];
% Créez une grille pour les axes X, Y
[X, Y] = meshgrid(Vc, Vf);
% Définir les couleurs pour chaque plaque
colors = {[0 0 0], [1 1 0], [0 1 0], [1 0.5 0]}; % Rouge, Vert, Bleu, Jaune
% Créez le graphe 3D
figure;
hold on;
% Affichez les surfaces pour chaque plaque
surf(X, Y, Fz_P1, 'FaceColor', colors{1}, 'EdgeColor', 'none', 'FaceAlpha', 0.7);
surf(X, Y, Fz_P2, 'FaceColor', colors{2}, 'EdgeColor', 'none', 'FaceAlpha', 0.7);
surf(X, Y, Fz_P3, 'FaceColor', colors{3}, 'EdgeColor', 'none', 'FaceAlpha', 0.7);
surf(X, Y, Fz_P4, 'FaceColor', colors{4}, 'EdgeColor', 'none', 'FaceAlpha', 0.7);
% Étiquettes des axes
xlabel('Vitesse de coupe Vc (mm/min)');
ylabel('Vitesse d'avance Vf (mm/tr)');
zlabel('Force (N)');
% Titre
title('Forces Moyennes pour Plaques');
% Légende pour identifier chaque plaque
legend('0%C 0%G', '2%C 0%G', '2%C 0,25%G', '2%C 2%G', 'Location', 'best');

% Paramètres d'affichage
grid on;
view(45, 30);
hold off;

```

ANNEXE II

Analyses de régression des forces du perçage

Étude statistique de la distribution des forces de coupe de la plaque CFRP (C=0%G=0%)

Afin d'évaluer l'effet spécifique de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance sur la force de coupe générée lors du perçage de plaques en CFRP, des analyses statistiques ont été réalisées. Ces tests visent à mieux comprendre l'influence des paramètres d'usinage sur la réponse mécanique mesurée, en vue d'une optimisation des conditions de perçage.

Dans ce cadre, un test de normalité d'Anderson-Darling a été appliqué aux résidus du modèle, afin de vérifier la validité de l'hypothèse de normalité, condition préalable pour l'utilisation de méthodes statistiques paramétrées. Le test a fourni une valeur de p égale à 0,063, ce qui est largement supérieur au seuil de signification usuel de 0,05. Cette valeur indique que l'hypothèse nulle (résidus normalement distribués) n'est pas rejetée, ce qui confirme que les résidus suivent une distribution normale et que les résultats de l'analyse statistique sont fiables dans ce contexte.

En conclusion, les résultats du test de normalité indiquent que les données analysées suivent une distribution normale. Cette observation est appuyée par la figure AII. 1, qui illustre la distribution des données obtenues à partir du test de normalité réalisé avec le logiciel Minitab.

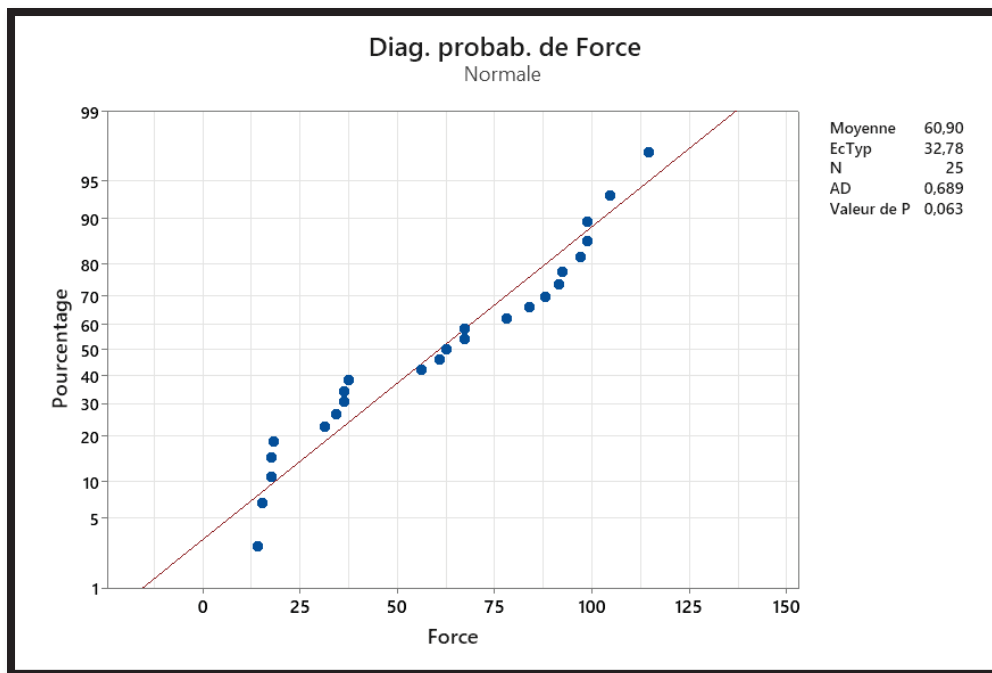


Figure AII. 1 Présentation de la distribution des données suite au test de normalité effectué avec Minitab sur le composite CFRP

Afin d'évaluer l'impact significatif des variables indépendantes, à connaître la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, sur la variable dépendante continue qu'est la force de coupe F_z , nous avons adopté deux approches d'analyse statistique paramétrique, en supposant que le modèle respecte une distribution normale. Ces méthodes incluent le test d'ANOVA (analyse de la variance) et le test t de Student. Elles permettent de déterminer si les variations observées entre différents groupes sont significatives, et ainsi de mieux caractériser l'effet statistique réel des facteurs d'usinage sur la force exercée au cours du perçage.

L'application du test ANOVA a révélé que la vitesse de coupe exerce une influence significative sur la température de l'outil de coupe, lors du perçage d'une plaque composite CFRP sans cire ni graphène (0 % C, 0 % G), mettant en évidence l'interaction entre les conditions de coupe et les réponses thermomécaniques du système.

Tableau AII. 1 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	223,3	55,81	3,69	0,026
vf	4	25324,0	6330,99	418,64	0,000
Erreur	16	242,0	15,12		
Total	24	25789,2			

Equation de régression

$$\begin{aligned} \text{Force} = & 60,895 - 3,83 V_{c50} - 1,81 V_{c100} + 4,65 V_{c150} \\ & + 2,01 V_{c200} - 1,02 V_{c250} - 44,29 V_{f0,005} - 25,72 V_{f0,02} + 2,06 V_{f0,05} + 25,96 V_{f0,08} + \\ & 41,99 V_{a0,11} \quad (\text{AII. 1}) \end{aligned}$$

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 $R^2=99,06\% \approx R^2_{\text{Ajusté}}=98,59\%$ ce qui suggère que le modèle est à la condition idéale. De plus, l'équation trouvée après cette analyse est :

$$\text{Force} = 0,1667 V_c + 1223,3 V_f - 0,000500 V_{c^2} - 3560 V_{f^2} + 0,013 V_c * V_f \quad (\text{AII. 2})$$

Les p-valeurs associées aux différents facteurs du modèle sont présentées dans le tableau AII.2.

Tableau AII. 2 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	118196	23639,2	1579,38	0,000
vc	1	447	447,1	29,87	0,000
vf	1	3536	3535,7	236,23	0,000
vc*vc	1	213	213,0	14,23	0,001
vf*vf	1	424	423,6	28,30	0,000
vc*vf	1	0	0,0	0,00	0,959
Erreur	20	299	15,0		
Total	25	118496			

En résumé, l'analyse des résultats obtenus sur la plaque GFRP dépourvue de cire et de graphène met en évidence un impact significatif de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance sur la force de coupe. Les sections suivantes poursuivront cette démarche en appliquant les mêmes tests aux autres configurations de plaques composites.

Étude statistique de la distribution des forces de coupe la plaque CFRP (C=0% et G=0,25%)

Après avoir effectué le test de normalité sur les valeurs de force de coupe, nous avons obtenu une valeur de p égale à 0,068, supérieure au seuil significatif de 0,05. Par conséquent, nous pouvons conclure que les données suivent une distribution normale, ce qui permet de justifier l'utilisation du test ANOVA. La figure suivante (figure AII. 2) illustre la distribution des données telle qu'elle a été obtenue suite au test de normalité réalisé avec Minitab

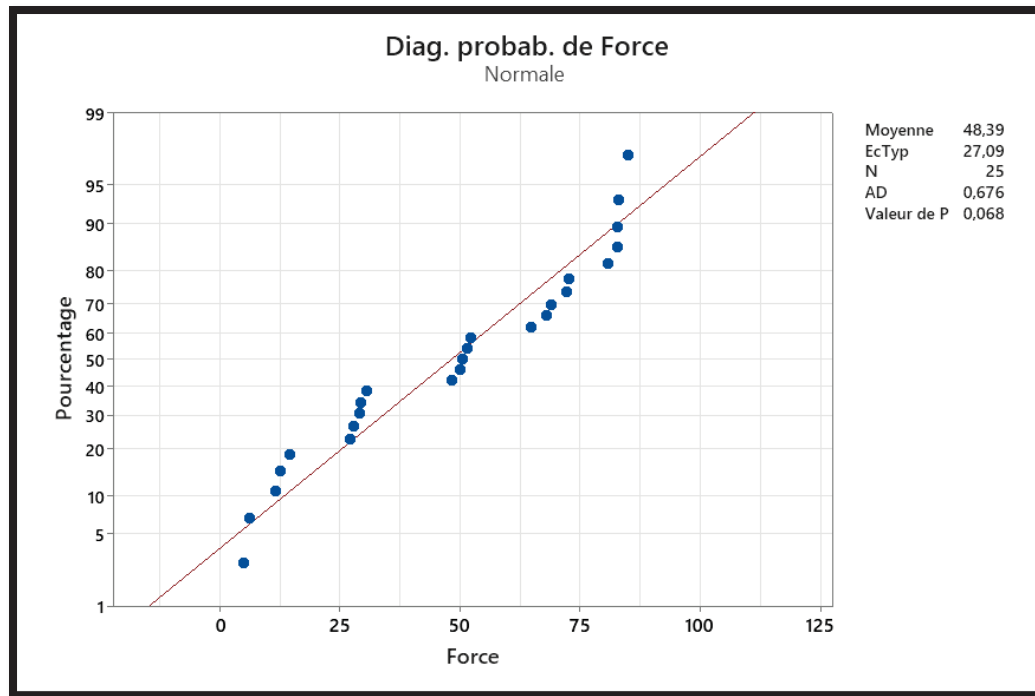


Figure AII. 2 Présentation de la distribution des données suite au test de normalité effectué avec Minitab sur le composite CFRP

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 5.3 présente les valeurs obtenues de vitesse de coupe et de vitesse d'avance.

Tableau AII. 3 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	27,4	6,85	1,02	0,429
vf	4	17475,7	4368,93	647,88	0,000
Erreur	16	107,9	6,74		
Total	24	17611,0			

En résumé, les résultats fournissent une équation mathématique exprimant un modèle plus pertinent et mieux ajusté.

$$\text{Force} = 0,101 V_c + 1081,1 V_a - 0,000348 V_c^2 - 3638 V_a^2 + 0,122 V_c * V_a \quad (\text{AII.3})$$

L'ensemble des p-valeurs relatives aux différents paramètres du modèle est présenté dans le tableau AII.4.

Tableau AII. 4 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	75985,1	15197,0	1814,99	0,000
vc	1	164,3	164,3	19,62	0,000
vf	1	2761,3	2761,3	329,79	0,000
vc*vc	1	103,5	103,5	12,36	0,002
vf*vf	1	442,5	442,5	52,85	0,000
vc*vf	1	3,6	3,6	0,43	0,519
Erreur	20	167,5	8,4		
Total	25	76152,6			

Évaluation statistique de la distribution des forces de perçage la plaque CFRP (C=0% et G=2%)

À la suite de l'application du test de normalité sur les valeurs de force de coupe, la valeur de p obtenue s'élève à 0,155, ce qui dépasse le seuil de signification habituel de 0,05. Ce résultat implique que l'on ne peut pas rejeter l'hypothèse de normalité, indiquant ainsi que les données sont compatibles avec une distribution normale. Le respect de cette condition est fondamental pour garantir la validité de l'analyse de variance (ANOVA), qui suppose justement la normalité des données. Afin d'illustrer cette conformité, la figure suivante présente la distribution des valeurs observées, telle qu'elle ressort du test de normalité effectué sur Minitab. Ce graphique confirme visuellement l'adéquation entre les données expérimentales et la distribution normale attendue.

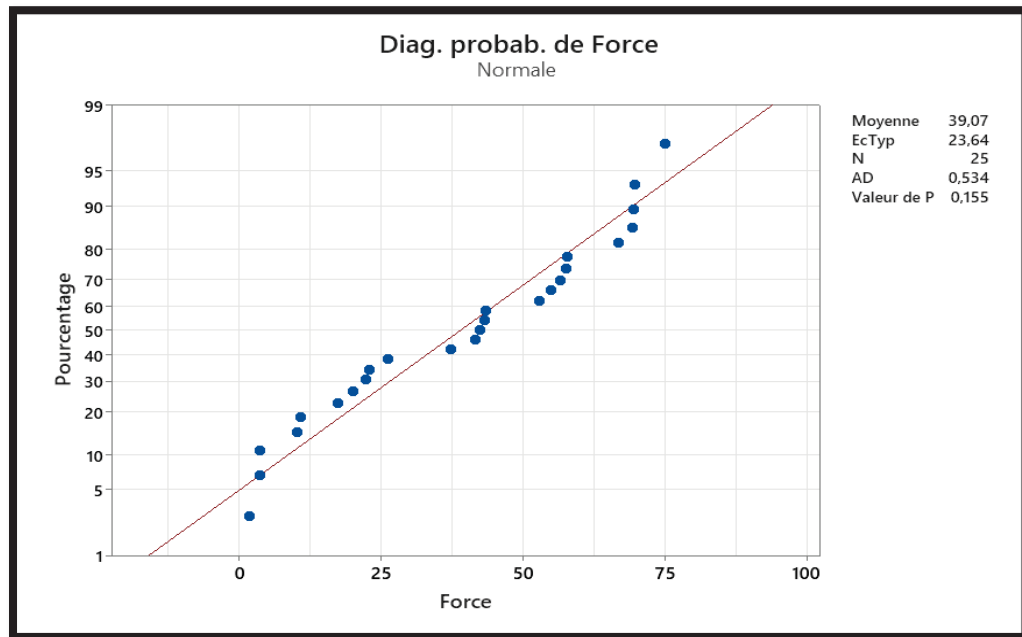


Figure AII. 3 Présentation de la distribution des données suite au test de normalité effectué avec Minitab sur le composite CFRP

La valeur de p associée à la vitesse d'ence est égale à 0, ce qui indique que ce paramètre exerce une influence hautement significative sur la force de coupe.

Le tableau AII.5 synthétise les résultats obtenus pour la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, mettant en évidence leur contribution respective à la variation de la force de coupe observée.

Tableau AII. 5 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	26,1	6,52	0,63	0,650
Vf	4	13223,6	3305,89	318,01	0,000
Erreur	16	166,3	10,40		
Total	24	13416,0			

Ces résultats conduisent à un modèle mathématique plus pertinent et plus performant :

$$\text{Force} = 0,0646 V_c + 853,4 V_a - 0,000265 V_c^2 - 2824 V_a^2 + 0,432 V_c * V_a \quad (\text{AII. 4})$$

Le tableau AII. 6 regroupe l'ensemble des p-valeurs obtenues pour les différents facteurs entrant dans l'équation du modèle.

Tableau AII. 6 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	51403,1	10280,6	1135,85	0,000
vc	1	67,2	67,2	7,42	0,013
vf	1	1720,8	1720,8	190,13	0,000
vc*vc	1	59,9	59,9	6,62	0,018
vf*vf	1	266,6	266,6	29,45	0,000
vc*vf	1	45,1	45,1	4,99	0,037
Erreur	20	181,0	9,1		
Total	25	51584,1			

Évaluation statistique de la distribution des forces de perçage CFRP (C=1% et G=0%)

Le test de normalité appliqué aux forces de coupe a donné une valeur de p de 0,071, supérieure au seuil de 0,05. Cela indique que les données suivent une distribution normale, condition requise pour l'application de l'ANOVA.

La figure AII. 4 illustre la correspondance des données expérimentales avec la distribution théorique normale.

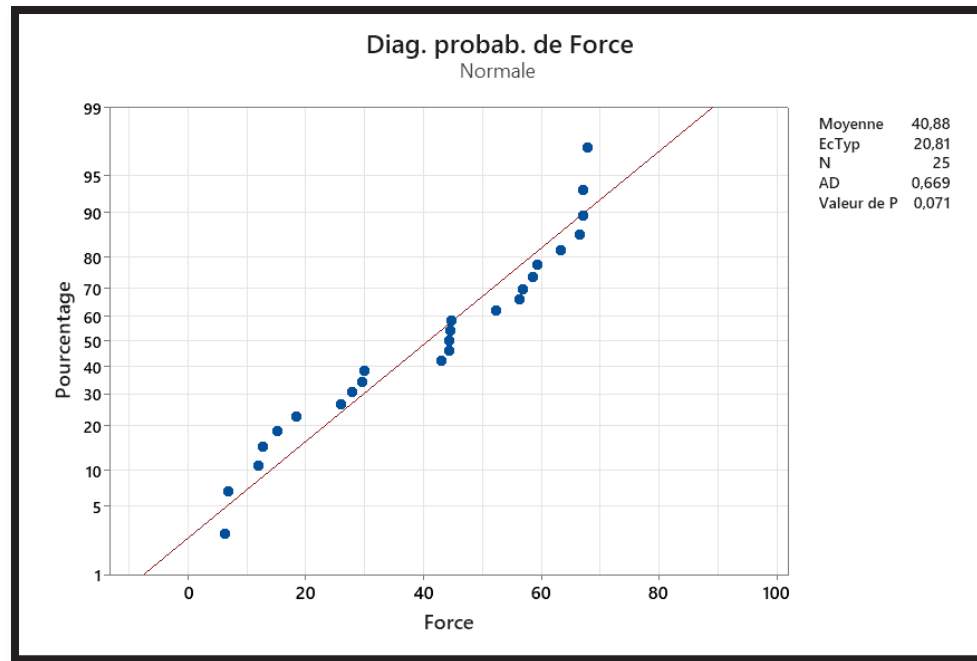


Figure AII. 4 Présentation de la distribution des données suite au test de normalité effectué avec Minitab sur le composite CFRP

La valeur de p liée à la vitesse d'avance est nulle, ce qui démontre que ce facteur exerce une influence extrêmement significative sur la force de coupe. Le tableau AII.7 présente un résumé des résultats obtenus pour la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, soulignant leur impact respectif sur la variation de la force de coupe mesurée.

Tableau AII. 7 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	52,3	13,07	0,86	0,506
vf	4	10097,9	2524,48	167,00	0,000
Erreur	16	241,9	15,12		
Total	24	10392,0			

Ainsi, les résultats obtenus permettent d'établir un modèle plus significatif, reposant sur une équation mathématique améliorée.

$$\text{Force} = 0,1460 V_c + 889,5 V_f - 0,000574 V_c^2 - 3725 V_f^2 + 0,407 V_c * V_f \quad (\text{AII. 5})$$

L'ensemble des p-valeurs relatives aux différents paramètres du modèle est présenté dans le tableau AII. 8.

Tableau AII. 8 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	51912,7	10382,5	793,04	0,000
vc	1	343,1	343,1	26,21	0,000
vf	1	1869,6	1869,6	142,80	0,000
vc*vc	1	281,1	281,1	21,47	0,000
vf*vf	1	463,8	463,8	35,43	0,000
vc*vf	1	40,2	40,2	3,07	0,095
Erreur	20	261,8	13,1		
Total	25	52174,5			

Évaluation statistique de la distribution des forces de perçage (C=1% et G=0,25%)

Le test de normalité réalisé sur les forces de coupe a révélé une valeur de p de 0,115, supérieure au seuil usuel de 0,05. Ce résultat confirme que les données suivent une distribution normale, condition indispensable pour l'utilisation du test ANOVA. La figure Figure AII. 5 illustre visuellement l'adéquation entre les données expérimentales et la distribution normale théorique.

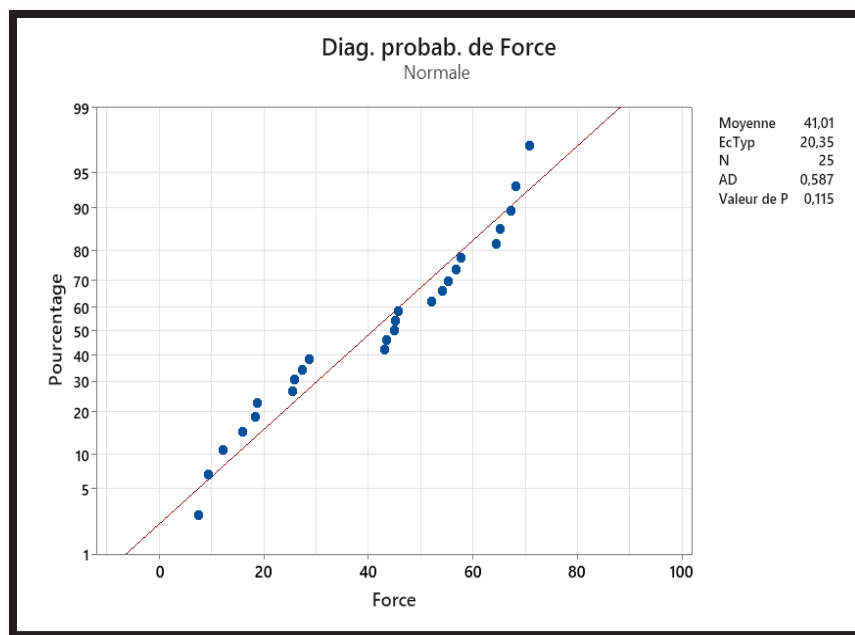


Figure AII. 5 Présentation de la distribution des données suite au test de normalité effectué avec Minitab sur le composite CFRP

La valeur de p associée à la vitesse d'avance est égale à zéro, ce qui indique que ce facteur exerce une influence hautement significative sur la force de coupe. Le tableau AII. 9 regroupe les résultats obtenus pour les effets de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance, mettant en lumière leur contribution respective à la variation de la force de coupe mesurée.

Tableau AII. 9 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	71,35	17,84	2,23	0,111
vf	4	9740,79	2435,20	304,64	0,000
Erreur	16	127,90	7,99		
Total	24	9940,04			

Par conséquent, les résultats fournissent un modèle optimisé et plus robuste, représenté par l'équation mathématique correspondante.

$$\text{Force} = 0,1194 V_c + 914,1 V_f - 0,000407 V_c^2 - 3338 V_f^2 - 0,049 V_c * V_f \quad (\text{AII.6})$$

Toutes les valeurs de p relatives aux divers facteurs du modèle sont synthétisées dans le tableau AII.10.

Tableau AII. 10 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	51608,0	10321,6	550,41	0,000
vc	1	229,5	229,5	12,24	0,002
vf	1	1974,2	1974,2	105,28	0,000
vc*vc	1	141,0	141,0	7,52	0,013
vf*vf	1	372,6	372,6	19,87	0,000
vc*va	1	0,6	0,6	0,03	0,861
Erreur	20	375,0	18,8		
Total	25	51983,1			

Évaluation statistique de la distribution des forces de perçage (C=1% et G= 2%)

Après avoir réalisé le test de normalité sur les valeurs de force de coupe, une valeur de p de 0,233 a été obtenue, supérieure au seuil usuel de 0,05. Cela confirme que les données suivent une distribution normale, condition nécessaire pour l'application du test ANOVA.

La figure AII. 6 présente la distribution des données telle qu'elle a été révélée par le test de normalité effectué avec Minitab.

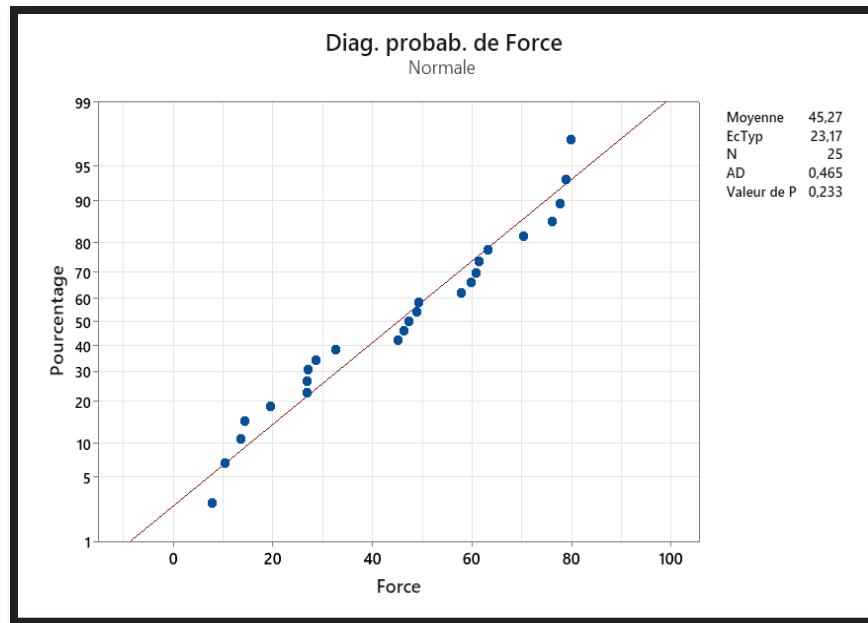


Figure AII. 6 Présentation de la distribution des données suite au test de normalité effectué avec Minitab sur le composite CFRP

La valeur de p correspondant à la vitesse d'avance est nulle, ce qui souligne l'impact extrêmement significatif de ce facteur sur la force de coupe. Le tableau AII. 11 présente un résumé des résultats relatifs à la vitesse de coupe ainsi qu'à la vitesse d'avance, mettant en évidence leur rôle respectif dans la variation observée de la force de coupe.

Tableau AII. 11 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	9,5	2,39	0,21	0,927
vf	4	12694,7	3173,67	283,81	0,000
Erreur	16	178,9	11,18		
Total	24	12883,2			

Ces conclusions permettent de construire un modèle mathématique plus fiable et significatif :

$$\text{Force} = 0,1437 V_c + 885 V_f - 0,000484 V_c^2 - 2768 V_f^2 + 0,191 V_c * V_f \quad (\text{AII. 7})$$

Le tableau AII. 12 récapitule les p-valeurs déterminées pour chacun des facteurs pris en compte dans l'équation du modèle.

Tableau AII. 12 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	63756,2	12751,2	702,31	0,000
vc	1	332,2	332,2	18,29	0,000
vf	1	1850,7	1850,7	101,93	0,000
vc*vc	1	199,7	199,7	11,00	0,003
vf*vf	1	256,2	256,2	14,11	0,001
vc*vf	1	8,8	8,8	0,49	0,493
Erreur	20	363,1	18,2		
Total	25	64119,3			

Évaluation statistique de la distribution des forces de perçage (C=2% et G= 0%)

Après avoir effectué le test de normalité sur les valeurs de force de coupe, une p-valeur de 0,091 a été obtenue, dépassant ainsi le seuil conventionnel de 0,05. Ce résultat confirme que les données respectent une distribution normale, condition indispensable pour l'usage du test ANOVA. La figure AII. 7 illustre la distribution des données telle que déterminée par le test de normalité réalisé à l'aide du logiciel Minitab.

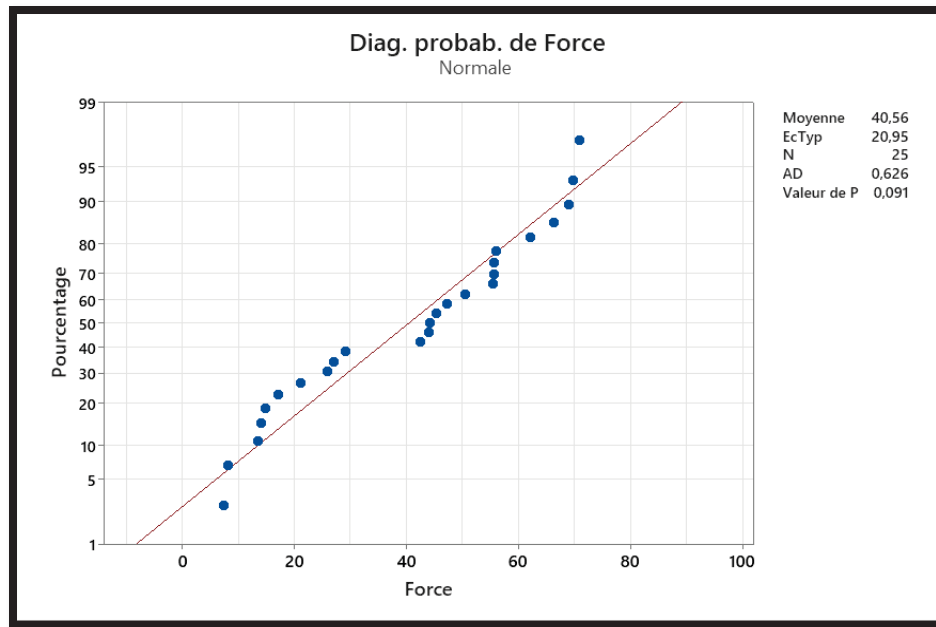


Figure AII. 7 Présentation de la distribution des données suite au test de normalité effectué avec Minitab sur le composite CFRP

La valeur de p associée à la vitesse d'avance est égale à zéro, ce qui met en évidence l'influence particulièrement significative de ce facteur sur la force de coupe.

Le tableau AII.13 synthétise les résultats concernant les effets de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance, illustrant leur contribution respective à la variation de la force de coupe mesurée.

Tableau AII. 13 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	24,2	6,05	0,47	0,757
vf	4	10304,8	2576,21	200,23	0,000
Erreur	16	205,9	12,87		
Total	24	10534,9			

Ainsi, les résultats obtenus permettent d'établir un modèle plus significatif, reposant sur une équation mathématique améliorée.

$$\text{Force} = 0,1063 V_c + 900,8 V_f - 0,00036 V_c^2 - 3244 V_f^2 + 0,032 V_c * V_f \quad (\text{AII. 8})$$

L'ensemble des p-valeurs relatives aux différents paramètres du modèle est présenté dans le tableau AII.14

Tableau AII. 14 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	51287,2	10257,4	545,91	0,000
vc	1	181,9	181,9	9,68	0,006
vf	1	1917,1	1917,1	102,03	0,000
vc*vc	1	110,4	110,4	5,87	0,025
vf*vf	1	351,8	351,8	18,72	0,000
vc*vf	1	0,3	0,3	0,01	0,909
Erreur	20	375,8	18,8		
Total	25	51663,0			

Évaluation statistique de la distribution des forces de perçage (C=2% et G= 0,25%)

À la suite du test de normalité effectué sur les forces de coupe, une valeur de p de 0,066 a été relevée, excédant le seuil usuel de 0,05. Cette observation valide l'hypothèse de normalité des données, condition clé pour appliquer l'ANOVA. La figure AII. 8 montre la distribution des données telle que calculée avec Minitab.

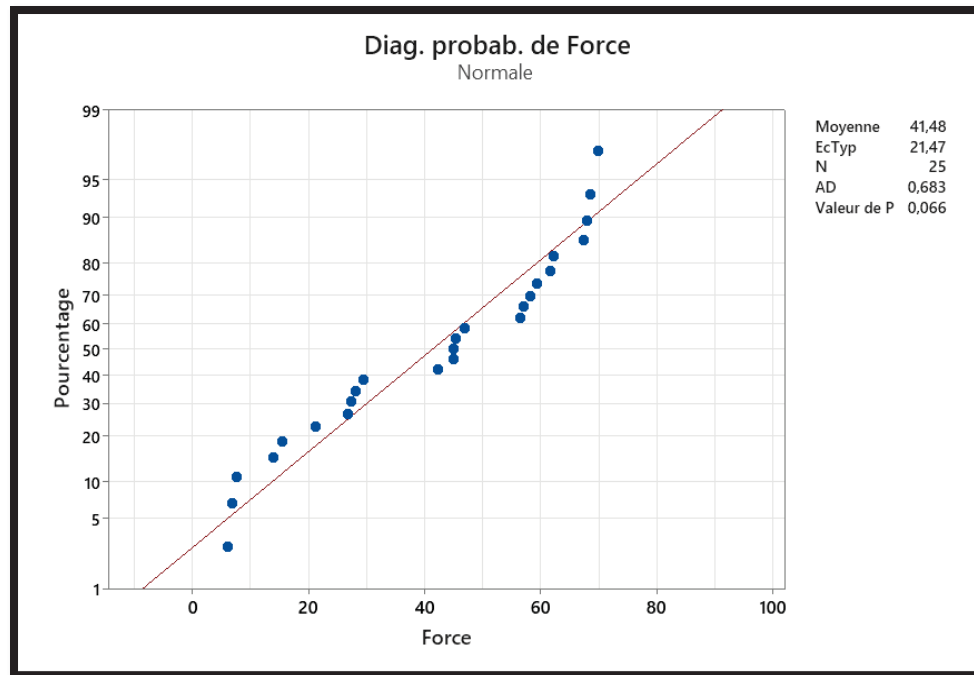


Figure AII. 8 Présentation de la distribution des données suite au test de normalité effectué avec Minitab sur le composite CFRP

La vitesse d'avance se révèle comme un facteur d'une influence très significative avec une p-valeur à zéro. Le tableau AII.15 compile les données relatives à la vitesse de coupe et à la vitesse d'avance, illustrant leur impact conjugué sur la force de coupe.

Tableau AII. 15 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	45,2	11,31	1,37	0,289
vf	4	10889,6	2722,40	329,14	0,000
Erreur	16	132,3	8,27		
Total	24	11067,2			

Ainsi, ces résultats appuient un modèle mathématique plus efficace et statistiquement solide :

$$\text{Force} = 0,0967 V_c + 1026,9 V_f - 0,000342 V_c^2 - 4190 V_f^2 - 0,051 V_c * V_f \quad (\text{AII. 9})$$

Le tableau AII. 16 offre une synthèse des valeurs de p trouvées pour les variables incluses dans l'équation du modèle.

Tableau AII. 16 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	53828,6	10765,7	872,46	0,000
vc	1	150,6	150,6	12,20	0,002
vf	1	2491,3	2491,3	201,90	0,000
vc*vc	1	99,5	99,5	8,07	0,010
vf*vf	1	586,9	586,9	47,57	0,000
vc*vf	1	0,6	0,6	0,05	0,823
Erreur	20	246,8	12,3		
Total	25	54075,4			

Évaluation statistique de la distribution des forces de perçage (C=2% et G= 2%)

La p-valeur issue du test de normalité sur les forces de coupe est de 0,091, soit au-dessus du seuil de 0,05, ce qui suggère que les données suivent une distribution normale. Cette condition étant remplie, l'ANOVA peut être légitimement utilisée. La figure AII.9 illustre la distribution correspondant aux résultats de Minitab.

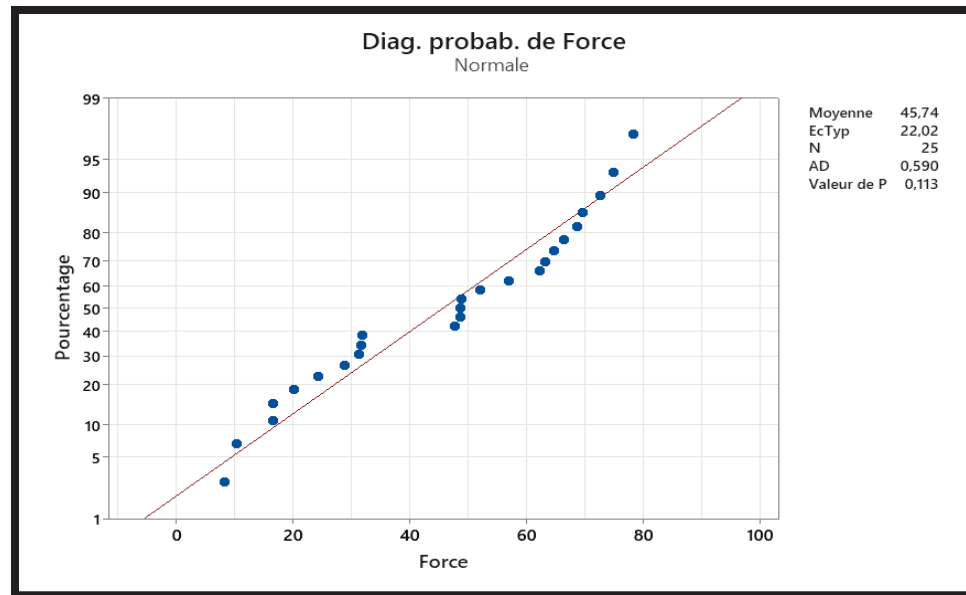


Figure AII. 9 Présentation de la distribution des données suite au test de normalité effectué avec Minitab sur le composite CFRP

Avec une p-valeur de zéro, la vitesse d'avance exerce un effet déterminant sur la force de coupe. Le tableau AII. 17 résume l'importance relative des vitesses de coupe et d'avance dans la variation de la force mesurée.

Tableau AII. 17 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	74,2	18,55	1,60	0,223
vf	4	11372,4	2843,10	245,19	0,000
Erreur	16	185,5	11,60		
Total	24	11632,2			

Par conséquent, les résultats fournissent un modèle optimisé et plus robuste, représenté par l'équation mathématique correspondante.

$$\text{Force} = 0,173 V_c + 974,2 V_f - 0,000622 V_c^2 - 3936 V_f^2 + 0,221 V_c * V_f \quad (\text{AII. 10})$$

Les résultats des tests statistiques pour tous les facteurs du modèle sont consignés dans le tableau AII. 18.

Tableau AII. 18 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	63647,3	12729,5	887,43	0,000
vc	1	481,9	481,9	33,60	0,000
vf	1	2242,5	2242,5	156,33	0,000
vc*vc	1	330,4	330,4	23,03	0,000
vf*vf	1	517,9	517,9	36,11	0,000
vc*vf	1	11,8	11,8	0,83	0,374
Erreur	20	286,9	14,3		
Total	25	63934,1			

ANNEXE III

Analyses de régression pour les températures du perçage

Analyse statistique de la distribution des températures de coupe de la plaque CFRP (C=0% et G=0%)

Après avoir réalisé le test de normalité sur les valeurs de température de coupe, une p-valeur de 0,16 a été obtenue, supérieure au seuil significatif de 0,05. Ce résultat indique que les données suivent une distribution normale, condition nécessaire à l'application du test ANOVA. La figure AII.10 présente la distribution des données telle que révélée par le test réalisé avec Minitab.

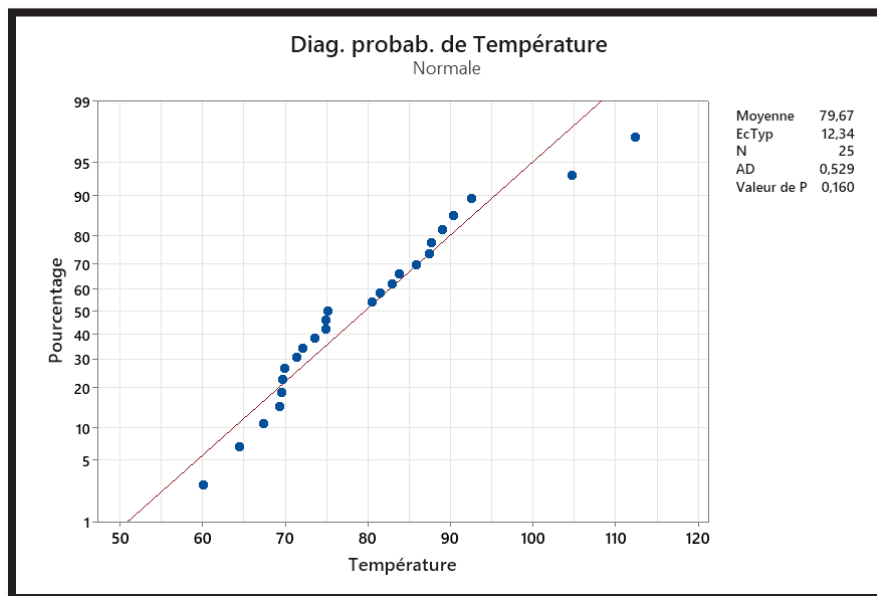


Figure AIII. 10 Graphique de distribution des données après le test de normalité sous Minitab pour la plaque composite CFRP

La probabilité associée à la vitesse de coupe est de 0,03, inférieure au seuil de signification fixé à 0,05. Par ailleurs, la statistique de test F principale est de 3,4, ce qui indique une différence significative entre la vitesse de coupe et la température de l'outil de coupe.

En revanche, pour le facteur vitesse d'avance, la valeur de p égale ,002, inférieure au seuil de signification, tandis que la valeur de F s'élève à (6,72), suggérant qu'il existe d'effet significatif de la vitesse d'avance sur la température de l'outil.

Tableau AIII. 19 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	880,5	220,12	3,40	0,034
vf	4	1740,3	435,08	6,72	0,002
Erreur	16	1035,9	64,75		
Total	24	3656,7			

Le tableau AIII.20 regroupe l'ensemble des p -valeurs obtenues pour les différents facteurs entrant dans l'équation du modèle.

Tableau AIII. 20 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	159714	31942,8	242,11	0,000
vc	1	15326	15325,8	116,16	0,000
Vf	1	653	653,1	4,95	0,038
vc*vc	1	4343	4342,9	32,92	0,000
vf*vf	1	55	54,9	0,42	0,526
vc*vf	1	3123	3122,8	23,67	0,000
Erreur	20	2639	131,9		
Total	25	162353			

L'équation initiale ne peut être appliquée directement en conditions réelles, car la température de l'outil de coupe avant usage n'est pas de 63,731 °C. Pour proposer un modèle statistique plus représentatif et mieux cerner l'influence combinée des paramètres de coupe sur la

température, une analyse de régression a été réalisée. L'ajustement du modèle aux données expérimentales est attesté par un coefficient de détermination $R^2=98,37\%$, très proche de celui ajusté ($R_{\text{ajusté}}^2=97,97\%$) ce qui indique que le modèle offre une description quasi idéale du comportement thermique observé.

$$T(^{\circ}\text{C}) = 0,9758 V_c + 526 V_f - 0,002257 V_c^2 - 1282 V_f^2 - 3,590 V_c * V_f \quad (\text{AIII. 1})$$

Analyse statistique de la distribution des températures de coupe de la plaque CFRP (C=0% et G=0,25%)

Le test de normalité appliqué aux températures de coupe a donné une p-valeur de 0,804, ce qui dépasse le seuil conventionnel de 0,05. Cette valeur confirme la normalité des données, autorisant ainsi l'utilisation du test ANOVA. La figure AII. 11 illustre cette distribution conforme, obtenue via Minitab.

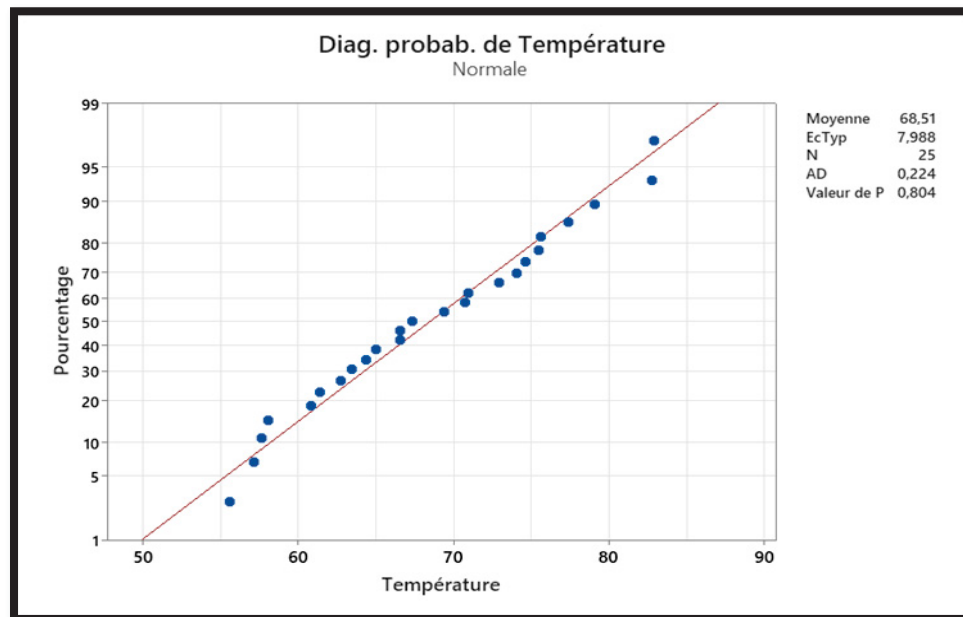


Figure AIII. 11 Graphique de distribution des données après le test de normalité sous Minitab pour la plaque composite CFRP

Étant donné que les p-valeurs pour la vitesse de coupe et la vitesse d'avance dépassent le seuil critique de 0,05, aucune influence statistiquement significative de ces facteurs sur la température de l'outil de coupe ne peut être démontrée. Les résultats correspondants figurent dans le tableau AIII. 21.

Tableau AIII. 21 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	511,9	127,96	2,44	0,089
vf	4	181,0	45,26	0,86	0,507
Erreur	16	838,5	52,40		
Total	24	1531,4			

Le tableau AIII. 21 regroupe l'ensemble des p-valeurs obtenues pour les différents facteurs entrant dans l'équation du modèle.

Tableau AIII. 22 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	115342	23068,3	130,43	0,000
vc	1	12581	12581,2	71,14	0,000
vf	1	470	470,0	2,66	0,119
vc*vc	1	5304	5303,8	29,99	0,000
vf*vf	1	11	10,7	0,06	0,809
vc*vf	1	1306	1306,0	7,38	0,013
Erreur	20	3537	176,9		
Total	25	118879			

Ces données aboutissent à un modèle renforcé, caractérisé par une meilleure signification statistique et traduit par une équation mathématique précise.

$$T(^{\circ}\text{C}) = 0,884 V_c + 446 V_f - 0,002494 V_c^2 - 564 V_f^2 - 2,322 V_c * V_f \quad (\text{AIII. 2})$$

En conclusion, l'analyse des résultats obtenus pour la plaque CFRP sans cire additionnée de 0,25 % de graphène met en évidence que l'ensemble des facteurs étudiés, à l'exception de l'interaction V_a et V_a^2 , exercent une influence significative sur la température de l'outil de coupe. Seule cette interaction ne présente pas d'effet notable sur le comportement thermique observé.

Analyse statistique de la distribution des températures de coupe de la plaque de la plaque CFRP (C=0% et G=2%)

Après avoir réalisé le test de normalité sur les valeurs des températures de foret de coupe, une p-valeur de 0,056 a été obtenue, supérieure au seuil significatif de 0,05.

Ce résultat indique que les données suivent une distribution normale, condition nécessaire à l'application du test ANOVA. La figure AIII.12 présente la distribution des données telle que révélée par le test réalisé avec Minitab.

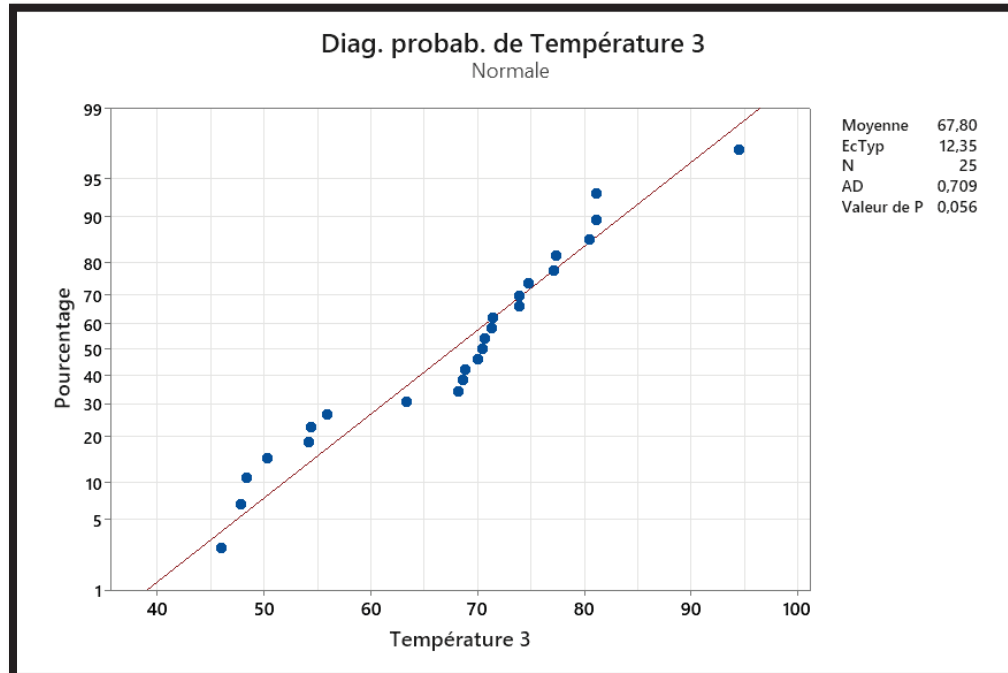


Figure AIII. 12 Graphique de distribution des données après le test de normalité sous Minitab pour la plaque composite CFRP

La vitesse de coupe influence de manière statistiquement significative la température de l'outil de coupe ($p = 0,003$), ce qui atteste que les variations de cette vitesse modifient clairement la température mesurée. En revanche, la vitesse d'avance n'a pas d'effet notable sur la température dans les conditions expérimentales étudiées ($p = 0,6$). Le tableau AII.23 rassemble les résultats obtenus pour les vitesses de coupe et d'avance.

Tableau AIII. 23 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Vc	4	2091,7	522,93	6,26	0,003
Vf	4	235,5	58,87	0,71	0,600
Erreur	16	1335,9	83,50		
Total	24	3663,1			

Par conséquent, les résultats fournissent un modèle optimisé et plus robuste, représenté par l'équation mathématique correspondante.

$$T(C^{\circ}) = 0,907 V_c + 793 V_f - 0,003041 V_c^2 - 5153 V_f^2 - 0,82 V_c * V_f \quad (\text{AIII. 3})$$

Les résultats des tests statistiques pour tous les facteurs du modèle sont consignés dans le tableau AIII. 24.

Tableau AIII. 24 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	113970	22794,0	98,61	0,000
vc	1	13241	13240,7	57,28	0,000
vf	1	1486	1485,8	6,43	0,020
vc*vc	1	7887	7886,9	34,12	0,000
vf*vf	1	888	887,9	3,84	0,064
vc*vf	1	163	162,7	0,70	0,411
Erreur	20	4623	231,2		
Total	25	118593			

Analyse statistique de la distribution des températures de coupe de la plaque CFRP (C=1% et G=0%)

L'analyse de normalité des températures de foret a donné une p-valeur de 0,054, supérieure à 0,05, indiquant que l'échantillon respecte la normalité requise pour l'ANOVA. La figure AIII.13 illustre graphiquement cette distribution obtenue à partir du logiciel Minitab.

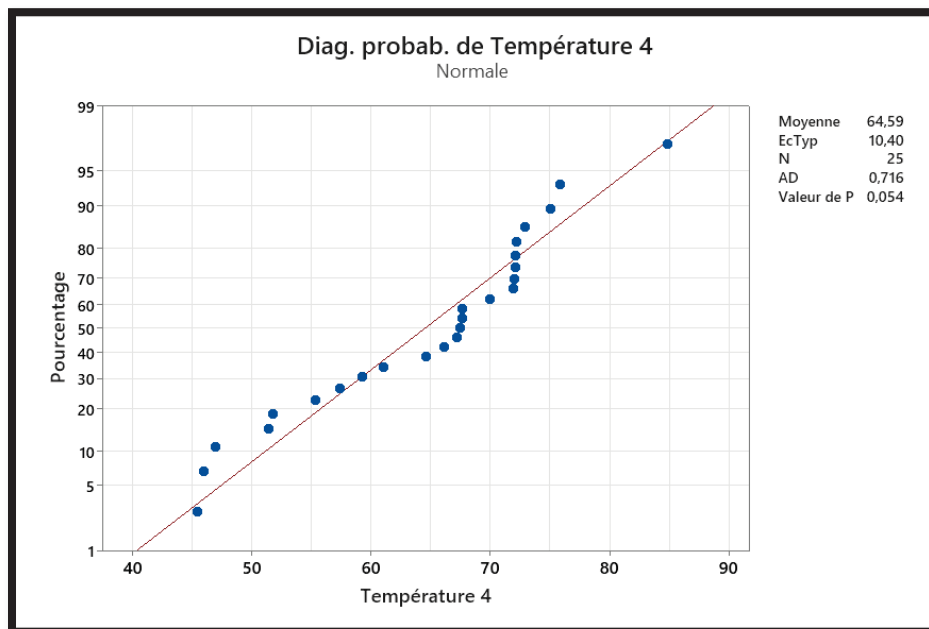


Figure AIII. 13 Graphique de distribution des données après le test de normalité sous Minitab pour la plaque composite CFRP

La valeur de p associée à la vitesse d'avance et à la vitesse de coupe n'indique pas d'effet significatif sur la température de l'outil de coupe. De même, ni la vitesse d'avance ni la vitesse de coupe n'exercent une influence déterminante sur cette température. Le tableau AIII. 25 ne met pas en évidence de contribution significative des vitesses de coupe et d'avance.

Tableau AIII. 25 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	798,8	199,71	2,15	0,122
vf	4	311,2	77,80	0,84	0,522
Erreur	16	1488,2	93,01		
Total	24	2598,2			

Ainsi, les résultats obtenus permettent d'établir un modèle plus significatif, reposant sur une équation mathématique améliorée.

$$T(C^{\circ}) = 0,709 V_c + 579 V_f - 0,001836 V_c^2 - 506 V_f^2 - 2,8 V_c * V_f \quad (\text{AIII. 4})$$

Le tableau AIII.26 offre une synthèse des valeurs de p trouvées pour les variables incluses dans l'équation du modèle.

Tableau AIII. 26 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	99797	19959,4	56,17	0,000
vc	1	8083	8082,6	22,75	0,000
Vf	1	793	793,3	2,23	0,151
vc*vc	1	2874	2873,9	8,09	0,010
vf*vf	1	9	8,6	0,02	0,878
vc*vf	1	1895	1894,8	5,33	0,032
Erreur	20	7107	355,3		
Total	25	106904			

Analyse statistique de la distribution des températures de coupe de la plaque (C=1% et G=0,25%)

À la suite du test de normalité effectué sur les forces de coupe, une valeur de p de 0,722 a été relevée, excédant le seuil usuel de 0,05. Cette observation valide l'hypothèse de normalité des données, condition clé pour appliquer l'ANOVA. La figure AIII.14 montre la distribution des données telle que calculée avec Minitab.

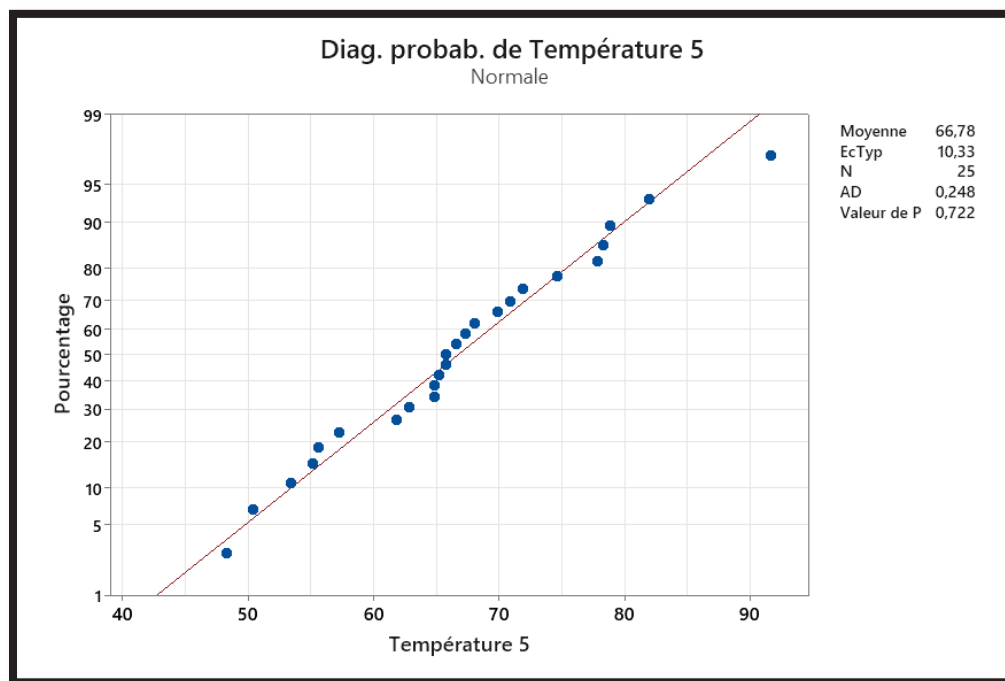


Figure AIII. 14 Graphique de distribution des données après le test de normalité sous Minitab pour la plaque composite CFRP

L'analyse de variance met en évidence une influence statistiquement significative de la vitesse de coupe sur la variable étudiée ($p = 0,002$), alors que la vitesse d'avance n'affiche pas d'effet significatif ($p = 0,544$). Les résultats détaillés sont présentés dans le tableau AIII. 27.

Tableau AIII. 27 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	1522,3	380,58	7,05	0,002
vf	4	172,5	43,13	0,80	0,544
Erreur	16	864,2	54,01		
Total	24	2559,0			

Ces résultats conduisent à un modèle mathématique plus pertinent et plus performant.

$$T(C^{\circ}) = 0,9091 V_c + 657 V_f - 0,002935 V_c^2 - 4183 V_f^2 - 0,918 V_c * V_f \quad (\text{AIII. 5})$$

Le tableau AIII.28 offre une synthèse des valeurs de p trouvées pour les variables incluses dans l'équation du modèle.

Tableau AIII. 28 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	111006	22201,2	146,17	0,000
vc	1	13303	13302,9	87,58	0,000
Vf	1	1019	1019,3	6,71	0,017
vc*vc	1	7347	7346,6	48,37	0,000
vf*vf	1	585	585,1	3,85	0,064
vc*vf	1	204	204,2	1,34	0,260
Erreur	20	3038	151,9		
Total	25	114044			

Analyse statistique de la distribution des températures de coupe de la plaque CFRP (C=1% et G= 2%)

La p-valeur issue du test de normalité sur les températures de foret est de 0,327, soit au-dessus du seuil de 0,05, ce qui suggère que les données suivent une distribution normale. Cette condition étant remplie, l'ANOVA peut être légitimement utilisée. La figure AII.15 illustre la distribution correspondant aux résultats de Minitab.

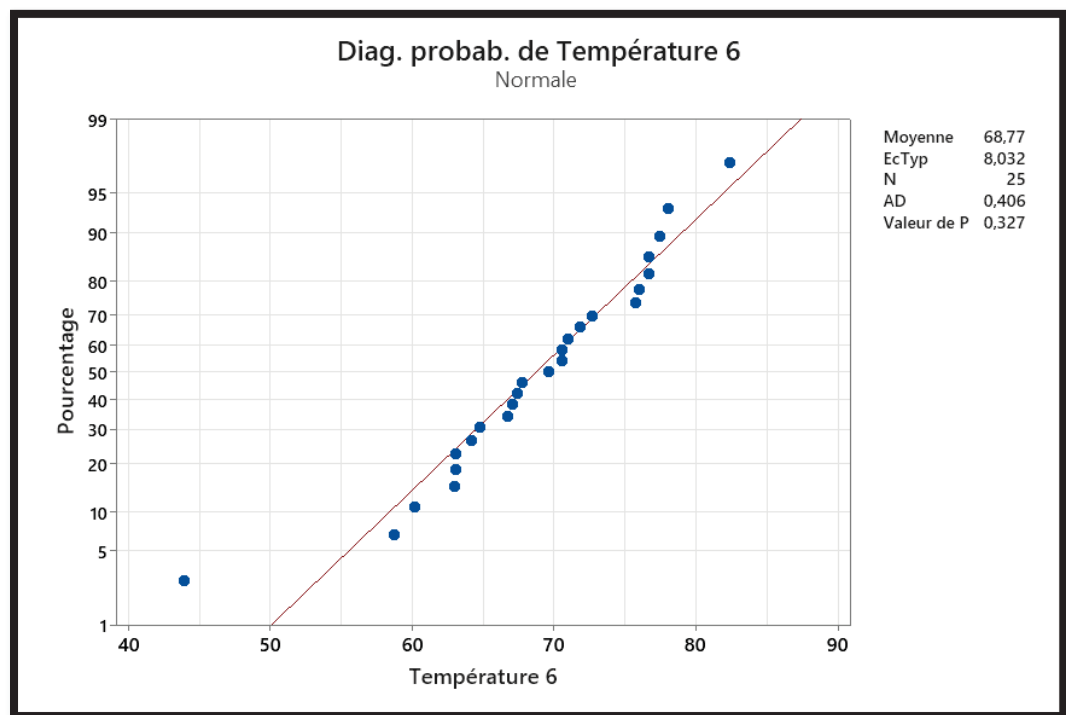


Figure AIII. 15 Graphique de distribution des données après le test de normalité sous Minitab pour la plaque composite CFRP

Étant donné que les p-valeurs pour la vitesse de coupe et la vitesse d'avance sont légèrement supérieures à 0,05, on ne peut pas démontrer statistiquement l'existence d'un effet significatif de ces variables sur la température de l'outil de coupe. Les résultats détaillés sont présentés dans le tableau AIII.29.

Tableau AIII. 29 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	460,4	115,11	2,78	0,063
vf	4	426,4	106,59	2,58	0,077
Erreur	16	661,6	41,35		
Total	24	1548,4			

Ainsi, les résultats obtenus permettent d'établir un modèle plus significatif, reposant sur une équation mathématique améliorée.

$$T(C^{\circ}) = 0,8100 V_c + 746V_f - 0,002403 V_c^2 - 4935 V_f^2 - 0,807 V_c * V_a \quad (\text{AIII. 6})$$

L'ensemble des p-valeurs relatives aux différents paramètres du modèle est présenté dans le tableau AII.30.

Tableau AIII. 30 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	117323	23464,5	189,65	0,000
vc	1	10561	10560,6	85,35	0,000
vf	1	1314	1314,1	10,62	0,004
vc*vc	1	4925	4924,9	39,80	0,000
vf*vf	1	814	814,3	6,58	0,018
vc*vf	1	158	157,9	1,28	0,272
Erreur	20	2475	123,7		
Total	25	119797			

Analyse statistique de la distribution des températures de coupe de la plaque (C=2% et G= 0%)

Après avoir réalisé le test de normalité sur la température de foret de coupe, une valeur de p de 0,069 a été obtenue, supérieure au seuil usuel de 0,05. Cela confirme que les données suivent

une distribution normale, condition nécessaire pour l'application du test ANOVA. La figure AIII.16 présente la distribution des données telle qu'elle a été révélée par le test de normalité effectué avec Minitab.

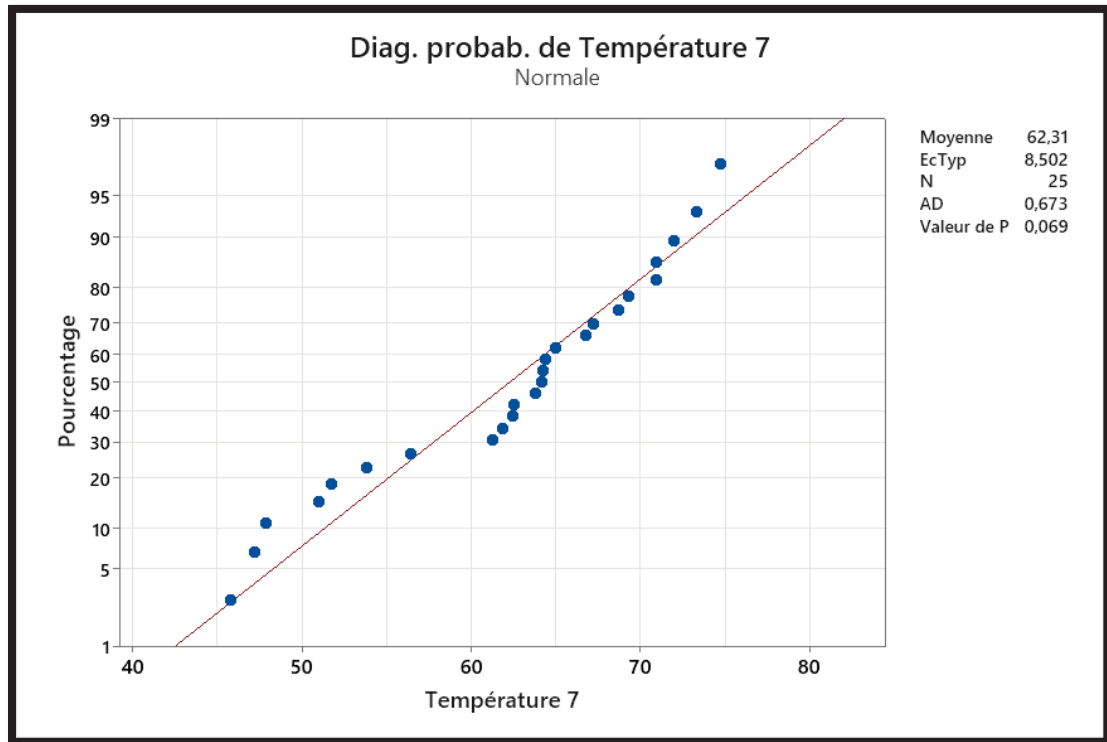


Figure AIII. 16 Graphique de distribution des données après le test de normalité sous Minitab pour la plaque composite CFRP

La vitesse de coupe et la vitesse d'avance présentent respectivement des p-valeurs de 0,533 et 0,752, soit au-dessus du seuil de 0,05. Dès lors, ces paramètres n'influencent pas la température de l'outil de coupe de manière significative. Les résultats détaillés sont consignés dans le tableau AIII.31.

Tableau AIII. 31 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	267,5	66,88	0,82	0,533
vf	4	156,3	39,08	0,48	0,752
Erreur	16	1311,2	81,95		
Total	24	1735,0			

Ces données aboutissent à un modèle renforcé, caractérisé par une meilleure signification statistique et traduit par une équation mathématique précise.

$$T(C^{\circ}) = 0,754 V_c + 683V_f - 0,002154 V_c^2 - 3586 V_f^2 - 1,777 V_c * V_f \quad (\text{AIII. 7})$$

Les résultats des tests statistiques pour tous les facteurs du modèle sont consignés dans le tableau AIII. 32.

Tableau AIII. 32 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	94924,0	18984,8	98,05	0,000
Vc	1	9157,0	9157,0	47,29	0,000
Vf	1	1103,2	1103,2	5,70	0,027
vc*vc	1	3957,2	3957,2	20,44	0,000
vf*vf	1	430,0	430,0	2,22	0,152
vc*vf	1	765,0	765,0	3,95	0,061
Erreur	20	3872,3	193,6		
Total	25	98796,3			

Analyse statistique de la distribution des températures de coupe de la plaque CFRP (C=2% et G= 0,25%)

Le test de normalité mené sur les valeurs de température de foret de coupe a donné une valeur de p égale à 0,267, supérieure au seuil conventionnel de 0,05. Ce résultat confirme la normalité des données, condition préalable à l'application de l'ANOVA. La figure AIII.17 montre la distribution ainsi obtenue lors du test de normalité effectué sous Minitab.

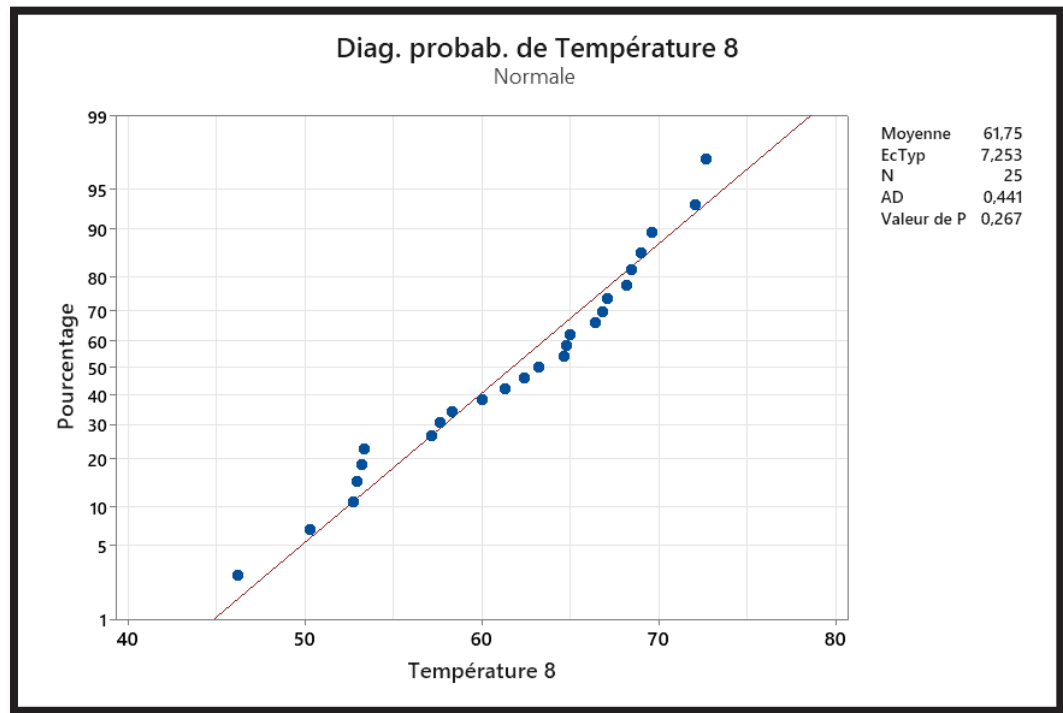


Figure AIII. 17 Graphique de distribution des données après le test de normalité sous Minitab pour la plaque composite CFRP

L'obtention de p-valeurs inférieures à 0,05 pour la vitesse de coupe et la vitesse d'avance prouve que ces deux paramètres ont un impact significatif sur la température de l'outil de coupe. Les résultats détaillés sont consignés dans le tableau AII. 33.

Tableau AIII. 33 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
vc	4	755,9	188,98	12,62	0,000
vf	4	267,0	66,75	4,46	0,013
Erreur	16	239,6	14,98		
Total	24	1262,5			

Ces résultats conduisent à un modèle mathématique plus pertinent et plus performant.

$$T(C^{\circ}) = 0,7409V_c + 720V_a - 0,002288V_c^2 - 3797 V_f^2 - 1,212V_c * V_f \quad (\text{AIII. 8})$$

Le tableau AIII. 34 offre une synthèse des valeurs de p trouvées pour les variables incluses dans l'équation du modèle.

Tableau AIII. 34 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	94814,9	18963,0	212,53	0,000
Vc	1	8834,6	8834,6	99,02	0,000
vf	1	1224,5	1224,5	13,72	0,001
vc*vc	1	4464,5	4464,5	50,04	0,000
vf*vf	1	482,0	482,0	5,40	0,031
vc*vf	1	356,1	356,1	3,99	0,060
Erreur	20	1784,5	89,2		
Total	25	96599,4			

Analyse statistique de la distribution des températures de coupe de la plaque (C=2% et G= 2%)

Le test de normalité appliqué aux valeurs de force de coupe a révélé une p-valeur de 0,14, supérieure au seuil usuel de 0,05, validant ainsi l'hypothèse de normalité des données. Cette condition est requise pour la mise en œuvre du test ANOVA. La figure AIII.18 présente la distribution des données obtenue grâce à l'analyse réalisée sous Minitab.

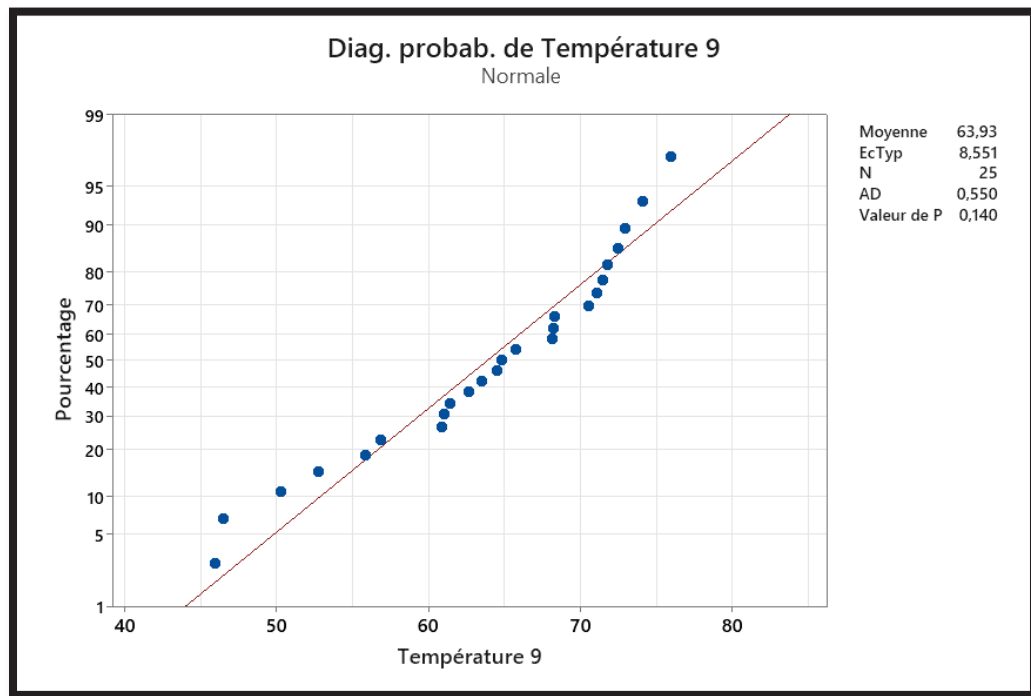


Figure AIII. 18 Graphique de distribution des données après le test de normalité sous Minitab pour la plaque composite CFRP

La vitesse de coupe et la vitesse d'avance présentent respectivement des p-valeurs de 0 et 0,02, soit au-dessus du seuil de 0,05. Dès lors, ces paramètres influencent la température de l'outil de coupe de manière significative. Les résultats détaillés sont consignés dans le tableau AIII. 35.

Tableau AIII. 35 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Vc	4	984,7	246,18	10,21	0,000
Vf	4	384,5	96,13	3,99	0,020
Erreur	16	385,7	24,11		
Total	24	1754,9			

Ces conclusions permettent de construire un modèle mathématique plus fiable et significatif.

$$T(C^{\circ}) = 0,7772 v_c + 781 v_f - 0,002478 V_c^2 - 4583 V_f^2 - 0,961 V_c * V_f \quad (\text{AIII. 9})$$

Un résumé des p-valeurs correspondant à chaque facteur du modèle figure dans le tableau AIII. 36.

Tableau AIII. 36 Analyse de la variance

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	5	101784	20356,9	190,22	0,000
vc	1	9722	9721,6	90,84	0,000
vf	1	1440	1439,9	13,45	0,002
vc*vc	1	5237	5237,2	48,94	0,000
vf*vf	1	702	702,1	6,56	0,019
vc*vf	1	224	223,6	2,09	0,164
Erreur	20	2140	107,0		
Total	25	103925			

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Afsset. (2010). *Fabrication et usinage des matériaux composites à base de fibres de carbon*. <https://www.greenmaterials.fr/wp-content/uploads/2010/07/Materiaux-composites-a-base-de-fibres-de-carbone.pdf>
- Alarifi, I. M. (2023). A Review on Factors Affecting Machinability and Properties of Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), 2154304. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2154304>
- Bolat, Ç., Karakılınç, U., Yalçın, B., Öz, Y., Yavaş, Ç., Ergene, B., Ercetin, A., & Akkoyun, F. (2023). Effect of Drilling Parameters and Tool Geometry on the Thrust Force and Surface Roughness of Aerospace Grade Laminate Composites. *Micromachines*, 14(7), 1427. <https://doi.org/10.3390/mi14071427>
- Brek, S. (2023). *Comportement mécanique des matériaux composites* (n°1). Université Abbès LaghroudeKhonchela,Algérie. https://www.researchgate.net/publication/374697972_Materiaux_composites_Comportement_mecanique_des_materiaux_composites_cours_et_exercices#fullTextFileContent
- Campus industrie. (2015). *Les procédés de mise en œuvre des matériaux composites*. <https://www.campus-industrie.eu/wp-content/uploads/2016/07/conference-campus-industrie-16-fevrier-2015-procedes-traditionnels-composites.pdf>
- Cao, P., Zhu, Z., Buck, D., Guo, X., Ekevad, M., & Wang, X. A. (2019). Effect of rake angle on cutting performance during machining of stone-plastic composite material with polycrystalline diamond cutters. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(1), 351-356. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-1237-y>
- CHAUSSOY, N. (2021). *Synthèse et caractérisations de résines thermostables pour matériaux composites carbonés* [Ecole Doctorale N° 34 Matériaux de Lyon]. <https://theses.hal.science/tel-03405712/document>
- Comité d'experts spécialisés, « Evaluation des risques liés aux substances chimiques », & Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail 2. (2010). *Fabrication et usinage des matériaux composites à base de fibres de carbone*. [Rapport d'expertise]. afsset. <https://www.greenmaterials.fr/wp-content/uploads/2010/07/Materiaux-composites-a-base-de-fibres-de-carbone.pdf>

- Davim, J. P., & Reis, P. (2003). Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—Experimental and statistical study. *Materials & Design*, 24(5), 315-324. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00062-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00062-1)
- DUPUPET, G. (2008, avril 10). *Fibre de carbone*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/materiaux-composites-presentation-et-renforts-42142210/fibres-de-carbone-am5134/procedes-de-fabrication-des-fibres-de-carbone-am5134niv10001.html>
- 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>
- Feito, N., Díaz-Álvarez, J., López-Puente, J., & Miguelez, M. H. (2018). Experimental and numerical analysis of step drill bit performance when drilling woven CFRPs. *Composite Structures*, 184, 1147-1155. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.061>
- Gao, C., Xiao, J., Xu, J., & Ke, Y. (2016). Factor analysis of machining parameters of fiber-reinforced polymer composites based on finite element simulation with experimental investigation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(5-8), 1113-1125. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7592-2>
- Geier, N., & Szalay, T. (2017). Optimisation of process parameters for the orbital and conventional drilling of uni-directional carbon fibre-reinforced polymers (UD-CFRP). *Measurement*, 110, 319-334. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.007>
- Gernitex. (s. d.). *Propriétés de la fibre de carbone*. <https://gernitex.com/fr/ressources/fibre-de-carbone-proprietes/>
- Ghafarizadeh, S., Chatelain, J.-F., & Lebrun, G. (2016). Effect of cutting tool lead angle on machining forces and surface finish of CFRP laminates. *Science and Engineering of Composite Materials*, 23(5), 543-550. <https://doi.org/10.1515/secm-2013-0188>
- Giorgio, M. (2021). *A3DM-31- LES MATÉRIAUX COMPOSITES - The composite materials*. https://www.researchgate.net/publication/371875696_A3DM-31-_LES_MATERIAUX_COMPOSITES_-_The_composite_materials?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InNlYXJjaCIsInBvc2l0aW9uIjoicGFnZUhlYWRLciJ9fQ

- Gohorianu, G. (2008). *Interactions entre les défauts d'usinage et la tenue en matage d'assemblages boulonnés en carbone/epoxy* [Toulouse 3]. <http://thesesups.ups-tlse.fr/248/>
- Haddad, M., Zitoune, R., Eyma, F., & Castanié, B. (2015). Influence of Machining Process and Machining Induced Surface Roughness on Mechanical Properties of Continuous Fiber Composites. *Experimental Mechanics*, 55(3), 519-528. <https://doi.org/10.1007/s11340-014-9967-y>
- JAMMEL, S. (2025). *Effet des additifs de graphène et de cire sur la qualité du perçage de matériaux composites de type GFRP*. https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/3608/1/Jammel_Siwar.pdf
- John, K. M., & Kumaran, S. T. (2020). A feasible strategy to produce quality holes using temperature-assisted drilling on CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(11-12), 3113-3127. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06089-w>
- Kaneeda, T. (1991). *Mécanisme de coupe en PRFC* [Université des sciences d'OkayamaDépartement de génie des systèmes mécaniques]. https://www.researchgate.net/publication/284024075_CFRP_cutting_mechanism
- Karpat, Y., & Bahtiyar, O. (2015). Comparative Analysis of PCD Drill Designs During Drilling of CFRP Laminates. *Procedia CIRP*, 31, 316-321. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.094>
- Lissek, F., Tegas, J., & Kaufeld, M. (2016). Damage Quantification for the Machining of CFRP: An Introduction about Characteristic Values Considering Shape and Orientation of Drilling-induced Delamination. *Procedia Engineering*, 149, 2-16. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.632>
- Mathieu, R. (2020). *Influence du graphène sur la température de détournage de composite carbone-époxy* [ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC]. https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2676/1/MATHIEU_Ronan.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>

- Melentiev, R., Priarone, P. C., Robiglio, M., & Settineri, L. (2016). Effects of Tool Geometry and Process Parameters on Delamination in CFRP Drilling : An Overview. *Procedia CIRP*, 45, 31-34. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.255>
- Navigation principale & CNRS Physique. (2023). *Comment mieux exploiter les propriétés mécaniques exceptionnelles du graphène*. <https://www.inp.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/comment-mieux-exploiter-les-proprietes-mecaniques-exceptionnelles-du-graphene>
- Ning, H., Zheng, H., & Wang, G. (2022). Establishment of Analytical Model for CFRP Cutting Force Considering the Radius of the Edge Circle. *Materials*, 15(6), 2127. <https://doi.org/10.3390/ma15062127>
- Pérez-Salinas, C., Castro-Miniguano, C., Moya-Moya, E., & Goyos, L. (2023). Analysis of surface roughness and delamination factor applied to the drilling of hybrid polymeric composite materials by the Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, S2214785323038294. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.437>
- Poulachon, G., Outeiro, J., Ramirez, C., André, V., & Abrivard, G. (2016). Hole Surface Topography and Tool Wear in CFRP Drilling. *Procedia CIRP*, 45, 35-38. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.348>
- Ruch, F. (2015, février 16). *Les procédés de mise en oeuvre des matériaux composites*. <https://campus-industrie.eu/wp-content/uploads/2016/07/conference-campus-industrie-16-fevrier-2015-procedes-traditionnels-composites.pdf>
- Santhanam, A. T., & Quinto, D. T. (1994). Surface Engineering of Carbide, Cermet, and Ceramic Cutting Tools. In C. M. Cotell, J. A. Sprague, & F. A. Smidt (Éds.), *Surface Engineering* (p. 900-908). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v05.a0001320>
- Slamani, M., Jammel, S., & Chatelain, J.-F. (2025). Effects of wax and graphene concentrations on cutting force in drilling GFRP composites : A comprehensive study using a full factorial design of experiments. *Journal of Composite Materials*, 00219983251341623. <https://doi.org/10.1177/00219983251341623>
- TELECON. (s. d.). *La différence entre PCD et CVD*. <https://telconpcd.com/diamond-pcd-or-cvd/>

- Thierry Stéphane TCHOUTENG. (2020). *Étude sur le perçage en montage flexible d'un composite unidirectionnel à fibres de lin et matrice époxy*. https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2559/2/TCHOUTENG_Thierry_Stephane-web.pdf
- Toray. (s. d.). *Comment est fabriquée la fibre de carbone Torayca*. <https://toray-cfe.com/question-ce-que-la-fibre-de-carbone/>
- Wang, D. H., Ramulu, M., & Arola, D. (1995). Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: Unidirectional laminate. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(12), 1623-1638. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00014-O](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00014-O)
- Wang, F., Qian, B., Jia, Z., Fu, R., & Cheng, D. (2017). Secondary cutting edge wear of one-shot drill bit in drilling CFRP and its impact on hole quality. *Composite Structures*, 178, 341-352. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.024>
- Wang, H., Sun, J., Li, J., & Li, W. (2014). Investigation on delamination morphology during drilling composite laminates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74(1-4), 257-266. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5973-6>
- Xu, J., An, Q., Cai, X., & Chen, M. (2013). Drilling machinability evaluation on new developed high-strength T800S/250F CFRP laminates. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(10), 1687-1696. <https://doi.org/10.1007/s12541-013-0252-2>
- Xu, J., El Mansori, M., Chen, M., & Ren, F. (2019). Orthogonal cutting mechanisms of CFRP/Ti6Al4V stacks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(9-12), 3831-3851. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03734-x>
- Xu, J., Geier, N., Shen, J., Krishnaraj, V., & Samsudeensadham, S. (2023). A review on CFRP drilling: Fundamental mechanisms, damage issues, and approaches toward high-quality drilling. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 9677-9707. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.023>
- Ze, G. K., Pramanik, A., Basak, A. K., Prakash, C., Shankar, S., & Radhika, N. (2023). Challenges associated with drilling of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites-A review. *Composites Part C: Open Access*, 11, 100356. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100356>
- Zenia, S. (2017). *Modélisation numérique de l'usinage des matériaux composites à matrice polymère et fibres longues de carbone*. L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE.

- Zenia, S., Ben Ayed, L., Nouari, M., & Delamézière, A. (2015). Numerical analysis of the interaction between the cutting forces, induced cutting damage, and machining parameters of CFRP composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(1-4), 465-480. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6600-2>
- Zhang, J., Shen, B., & Sun, F. (2013). Fabrication and drilling tests of chemical vapor deposition diamond coated drills in machining carbon fiber reinforced plastics. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 18(4), 394-400. <https://doi.org/10.1007/s12204-013-1413-2>
- Zitoune, R., Collombet, F., Lachaud, F., Piquet, R., & Pasquet, P. (2005). Experiment?calculation comparison of the cutting conditions representative of the long fiber composite drilling phase. *Composites Science and Technology*, 65(3-4), 455-466. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.09.028>

