

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de master académique en Génie
Mécanique Option :
Fabrication Mécanique et Productique

Thème

Analyse de la qualité des perçages
des matériaux composites utilisés
dans la construction navale

Proposé et dirigé par
M.KACIMI Bachir
Mme.TEKLAL Fatiha

Réalisé par
CHABI Sabrina

Promotion : 2023/2024

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout-puissant, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce mémoire.

Mes vifs remerciements et profondes gratitude vont à mon encadreur, M.KACIMI Bachir, pour son aide précieuse, ses encouragements et son soutien favorable à l'aboutissement de ce mémoire.

Je remercie vivement mon co-encadreur Mme.TEKLAL Fatiha, pour son aide et ses orientations durant la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier également les membres du jury qui me feront l'honneur de bien vouloir examiner ce travail.

À tous les enseignants de l'UMMTO, qui ont contribué à ma formation, j'adresse mes remerciements les plus sincères.

Je n'oublie pas mes parents pour leur soutien, leurs encouragements et leur patience tout au long de mon parcours scolaire et universitaire. Sans eux, je ne serais pas là aujourd'hui.

Enfin, à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de ce travail, trouvent ici l'expression sincère de ma reconnaissance et gratitude.

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à ma famille.

À mes parents qui ont toujours cru en moi et qui sont et seront une source d'inspiration et de bonheur pour moi. Vous êtes les rayons de soleil qui illuminent ma vie. Mon objectif a toujours été de vous rendre fiers.

À ma chère mère qui m'a toujours guidé dans la vie et qui est un exemple de motivation à suivre.

À mon père qui n'a jamais cessé de m'encourager à aller de l'avant afin que je sois la meilleure version de moi-même.

À mes chers frères, qui sont ma joie de vivre.

A ceux que j'aime et à ceux qui m'ont soutenue de près ou de loin en particulier.

Sabrina...

Résumé

Ce mémoire explore en profondeur les matériaux composites et leur processus de perçage, mettant en évidence leur importance dans divers domaines industriels, tels que l'aérospatiale, l'automobile et la construction.

La première partie offre une présentation générale des matériaux composites, définissant ces matériaux comme des structures composées de renforts et de matrices, offrant une résistance et une légèreté supérieures aux matériaux traditionnels. Les technologies de fabrication, notamment les techniques en moule ouvert et en moule fermé, sont également discutées, soulignant l'importance de ces processus dans la production des pièces composites de haute qualité.

La deuxième partie se concentre sur le perçage des matériaux composites, un processus crucial dans la fabrication de composants composites. Les différentes méthodes de perçage sont explorées, telles que le perçage par enlèvement de matière, par jet d'eau et au laser. Les défis rencontrés lors du perçage des composites, tels que la délamination et l'endommagement du matériau, sont analysés en détail. De plus, les conditions optimales de coupe sont examinées, mettant en évidence l'importance de facteurs tels que la géométrie de l'outil et la vitesse de coupe.

La troisième partie présente la partie expérimentale du travail, dans laquelle différentes configurations d'outils sont testées pour l'usinage des matériaux composites. Les résultats expérimentaux montrent que la sélection appropriée de l'outil a un impact significatif sur les performances d'usinage, avec l'outil 3 points émergeant comme le choix le plus efficace dans de nombreuses conditions. Ces résultats fournissent des informations précieuses pour l'optimisation des processus industriels et la sélection d'outils dans la fabrication de composants composites.

En conclusion, ce mémoire souligne l'importance stratégique des matériaux composites et de la recherche continue dans ce domaine. Il offre des perspectives pertinentes pour l'industrie en mettant en évidence les meilleures pratiques et les défis à relever dans la fabrication et l'usinage des matériaux composites, contribuant ainsi à l'amélioration des processus industriels et à l'avancement technologique dans divers secteurs.

Mots Clés : Matériau composite, construction navale, assemblage, perçage, plan expérimentale, dé laminage.

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	III
Introduction générale	1
I Présentation générale des matériaux composites	3
I.1 Introduction	4
I.2 Définition des matériaux composites	4
I.3 Les composants du matériau composite	5
I.3.1 Les renforts	5
I.3.2 Les matrices	12
I.3.3 Les charges et les additifs	17
I.3.4 Adhésion renforts / matrices	17
I.4 Architecture des matériaux composites	18
I.4.1 Les stratifiés à base de tissus unidirectionnels	18
I.4.2 Composites sandwiches	20
I.5 Procédé de mise en œuvre	21
I.5.1 Les technologies dites en moule ouvert	22
I.5.2 Les technologies dites en moules fermé	24
I.6 Conclusion	27
II Perçage des matériaux composites	28
II.1 Introduction	29
II.2 Définition de perçage	29
II.3 Type du perçage des matériaux composites	29
II.3.1 Perçage par enlèvement de la matière	29
II.3.2 Perçage par jet d'eau	31
II.3.3 perçage au laser	32

II.4	Problématique de perçage des matériaux composites	34
II.4.1	Les condition de perçage	34
II.4.2	Géométrie de l'outil	35
II.4.3	Matériaux d'outils	36
II.5	Les conditions de coupe optimales choisie pour perçage des matériaux composites	39
II.6	Endommagement du composite	41
II.6.1	Formation du copeau	42
II.6.2	Endommagements produits par la coupe des composites	44
II.7	Mécanismes d'endommagement dans les composites	47
II.8	Analyse de fissuration des matériaux composites	48
II.8.1	Rupture en fatigue	49
II.9	Caractérisation et quantification des défauts de perçage lies au perçage des stratifiés	51
II.9.1	Localisation des défauts	51
II.10	Conclusion	58
III	Partie expérimentale	59
III.1	Introduction	60
III.2	Matériaux de l'étude	60
III.2.1	Constituants de matériau	60
III.3	Élaboration des éprouvettes	61
III.4	Découpage des éprouvettes	61
III.5	Géométrie d'éprouvette de perçage	62
III.6	Paramètres de coupe et vitesses d'avance	64
III.6.1	Influence de type de l'outil et de la vitesse d'avance sur l'effort de coupe	65
III.6.2	Influence de diamètre et du type de l'outil sur l'effort de coupe	67
III.6.3	Influence de la vitesse de coupe et le type de l'outil sur l'effort de coupe	70
III.6.4	Conclusion	81
	Conclusion Générale	82
	Bibliographie	83
	ANNEXES	87

Table des figures

I.1	Constituants d'un matériau composite	5
I.2	Principaux matériaux de renfort	6
I.3	Différent type de fibre de verre.	6
I.4	Description des différentes opérations du procédé mécanique d'étirage permettant la fabrication des fibres de verre.	7
I.5	Fibre de carbone.	8
I.6	Schéma du principe de fabrication des fibres de carbone à base de PAN.	8
I.7	Fibre céramique.	9
I.8	une bobine de fibre d'aramide.	10
I.9	Les unidirectionnels.	11
I.10	Les différentes texture de renforts	11
I.11	Tissus : (a) multiaxial, (b) : 3D ou tresse	12
I.12	Tissu hybride carbone – aramide.	12
I.13	Différentes familles de matrice	13
I.14	Exemple du plan du drapage d'un composite stratifié.	18
I.15	Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié.	19
I.16	Modélisation par un système de ressorts des propriétés en flexion d'un composite stratifié.	20
I.17	Modélisation des bornes d'après la Loi des Mélanges.	20
I.18	Un sandwich en nid d'abeille	21
I.19	Principe du moulage au contact.	22
I.20	Principe du moulage au contact.	24
I.21	Principe du moulage par injection de résine.	25
I.22	Principe du moulage par compression à chaud de résine.	25
I.23	Principe de moulage par compression à froid de résine.	26
I.24	Principe du moulage par injection de mélange.	26

I.25	Principe de moulage sous vide.	27
II.1	Perçage par enlèvement de matière.	31
II.2	Perçage par jet d'eau.	31
II.3	Perçage au laser.	33
II.4	Géométrie d'un foret hélicoïdal ISO 3002/1-1982.	36
II.5	Outils à acier rapide.	37
II.6	Outils à carbure de tungstène.	37
II.7	Outils à nitrure de bore cubique.	38
II.8	Outils à diamant.	38
II.9	Autre types de forêts.	39
II.10	Mécanismes de formation du copeau en coupe orthogonale du composite carbone/époxy unidirectionnel.	43
II.11	Mécanismes de formation du copeau en coupe orthogonale du composite carbone/époxy Unidirectionnel	44
II.12	Taille de la zone endommagée d en fonction du rapport vitesse de coupe (de 1,5 à 40 m/min) sur vitesse d'avance de 20 à 460 mm/min.	46
II.13	Types de fissuration intra laminaire dans un pli tissé.	48
II.14	Observation d'une fissure transverse sur la tranche d'une éprouvette de tissu (sens trame)	48
II.15	Mécanisme de rupture d'un stratifié.	50
II.16	Rupture de fibres.	50
II.17	Rupture transverse de la matrice.	50
II.18	Rupture de l'interface fibre/matrice.	50
II.19	Rupture longitudinale de la matrice.	50
II.20	Rupture de l'interface entre les plis.	51
II.21	Défauts liés au perçage du CFRP.	51
II.22	Mécanisme d'apparition des défauts à l'entrée du foret lors du perçage d'un composite stratifié	52
II.23	Définition de l'air de dé-laminage.	52
II.24	Défaut en entrée du trou.	53
II.25	Critère de circularité.	53
II.26	Sollicitations des fibres selon leur angle par rapport à la vitesse de coupe.	54
II.27	Fibres à 0° par rapport à Vc. a) Illustration de la pénétration de l'arête découpe. b) Paroi de trou avec des fibres à 0° par rapport à Vc.	55
II.28	Dé cohésion fibre-matrice observé au microscope optique.	55
II.29	Fibres à -45° par rapport à Vc. a) Illustration de la pénétration de l'arête de coupe. b) Paroi de trou avec des fibres à -45° par rapport à Vc.	55
II.30	Arrachement de fibres observé au microscope optique.	56
II.31	Rupture de fibres après flexion.	56
II.32	Initiation d'un délaminage en sortie du trou.	57

II.33 Défaut en sortie du trou	57
III.1 Domaine d'utilisation du matériau composite	59
III.2 Les différents renforts utilisés ; a) Mat 300 g/m ² , b) Mat 450 g/m ² , c) Taffetas 800 g/m ²	59
III.3 Moulage au contact	60
III.4 Scie à disque diamanté	61
III.5 Influence de type de l'outil et de la vitesse d'avance sur l'effort de coupe : (a) : D=4mm, (b) : D=8mm ...	65
III.6 Perçage au diamètre 4 et 8 mm avec Vc=20 (m/min)	66
III.7 Influence de diamètre et du type de l'outil sur l'effort de coupe : (a) Vc=20 (m/min), (b) Vc=35 (m/min), (c) Vc=50 (m/min)	67
III.8 Influence de diamètre et du type de l'outil sur l'effort de coupe : (a) Vc=20 (m/min), (b) Vc=35 (m/min), (c) Vc=50 (m/min)	68
III.9 Influence de la vitesse de coupe et le type de l'outil sur l'effort de coupe	69
III.10 Perçage au diamètre 4 mm avec une avance de 0.02 (mm/tr)	70
III.11 Influence de la vitesse de coupe et le type de l'outil sur l'effort de coupe : (a) D=4 mm, (b) D=8 mm ...	71
III.12 Perçage au diamètre 4 et 8 mm avec une avance de 0.04 (mm/tr) 73	
III.13 Influence de la vitesse de coupe et le type de l'outil sur l'effort de coupe : (a) D=4 mm, (b) D=8 mm ...	74
III.14 Perçage au diamètre 4 et 8 mm avec une avance de 0.08 (mm/tr)	76
III.15 Influence de la vitesse de coupe et le type de l'outil sur l'effort de coupe	77
III.16 Perçage au diamètre 8 mm avec une avance de 0.12 (mm/tr)	78

Liste des tableaux

I.1	Les critères fondamentaux pour les matrices thermoplastiques et thermodurcissables.	13
I.2	Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques non renforcées. .	14
I.3	Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables non renforcées.	15
I.4	Synthèse de l'utilisation des résines et renforts.	15
I.5	Caractéristiques de la matrice polyester instauré.	16
II.1	Conditions de perçage pour les outils PCD et revêtements diamant A2C. .	40
II.2	Paramètres de perçage des stratifiés pour les forêts hélicoïdales.	41
III.1	Condition de perçage	62
III.2	Outils de perçage utilisé.	63
III.3	Paramètres de coupe et vitesses d'avance pour différents diamètres et conditions de coupe	64

Introduction générale

L'usinage des matériaux composites est devenu une préoccupation majeure dans le domaine de la fabrication industrielle en raison de leurs propriétés exceptionnelles, telles que leur légèreté, leur résistance élevée et leur durabilité. Ces matériaux sont de plus en plus utilisés dans divers secteurs, notamment l'aéronautique, l'automobile, les énergies renouvelables et les sports de haut niveau. Toutefois, leur nature hétérogène et anisotrope rend leur usinage, et plus particulièrement le perçage, particulièrement complexe.

Le développement et l'utilisation des matériaux composites sont toujours soumis aux besoins des utilisateurs. Des matériaux plus performants, plus économiques et durables dans le temps ont souvent des exigences auxquelles doit répondre les matériaux composites.

En raison des hautes exigences des matériaux contemporains, les matériaux composites sont très prisés. Mais quand on doit percer dans une telle matière, de nombreux problèmes surgissent. La question est de savoir quel est l'outil le plus indiqué et comment éviter d'abîmer le matériau. Un aspect est toujours central : le choix de l'outil, la vitesse de coupe et les réglages dépendent de la composition du matériau composite.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres, chacun abordant des aspects spécifiques de l'usinage des matériaux composites, suivi d'une conclusion générale.

Le premier chapitre est une présentation bibliographique touchant des généralités sur les matériaux composites tels que leurs constituants et leurs architectures ainsi que les différents procédés de mise en œuvre et les domaines d'application des matériaux composites.

Le deuxième chapitre est structuré en deux parties distinctes. La première partie se concentre principalement sur le perçage des matériaux composites par les différentes méthodes couramment employées, les divers matériaux d'outil utilisés pour ce genre, ainsi qu'une brève démonstration sur les mécanismes de coupe des composites.

La deuxième partie porte sur la caractérisation et la quantification des défauts de perçage liés au perçage des stratifiés, il s'agira dans un premier temps de répertorier dans la littérature l'ensemble des défauts spécifiques liés au perçage des structures en composites et de les classer, de les quantifier dans un second temps, afin de comprendre leurs mécanismes d'apparition.

Le troisième chapitre qui est la partie expérimentale, nous détaillons la fabrication des plaques et des éprouvettes en matériaux composites. nous avons réaliser des essais

de perçage en utilisant différentes configurations d'outils, vitesses de coupe, avance et diamètres d'outil pour analyser leur influence sur l'effort de coupe.

L'objectif est de déterminer les conditions optimales pour minimiser l'endommagement et maximiser l'efficacité du perçage.

Les résultats de cette étude mettent en évidence l'importance cruciale de la sélection de l'outil et des conditions de coupe dans l'usinage des matériaux composites. L'outil trois points s'avère être le plus efficace, offrant des efforts de coupe réduits et une stabilité remarquable. En revanche, l'outil trois lèvres montre une sensibilité accrue à la vitesse de coupe et des performances globalement inférieures. Ces conclusions soulignent l'impact significatif de la géométrie de l'outil et des conditions de coupe sur les performances d'usinage, et démontrent la nécessité d'une approche stratégique pour optimiser le processus de perçage des matériaux composites.

Nous avons terminé ce travail avec une conclusion générale sur les principaux aspects abordés dans cette étude et les résultats obtenus ainsi que des perspectives proposées.

CHAPITRE I

Présentation générale des matériaux composites

I.1 Introduction

L'étude et l'application des matériaux composites ont suscité un vif intérêt au sein de l'industrie depuis près d'un siècle. Ces structures, qu'elles revêtent un caractère hétérogène isotrope ou anisotrope, ont constamment démontré des performances supérieures à celles des matériaux homogènes, ouvrant ainsi des perspectives d'utilisation très prometteuses au sein de l'industrie.

Les matériaux composites sont largement utilisés aujourd'hui pour de nombreuses raisons, en raison de leurs avantages significatifs par rapport aux matériaux traditionnels. Voici quelques-unes des principales raisons pour lesquelles les matériaux composites sont utilisés de manière courante :

Légèreté et résistance : Les matériaux composites sont appréciés pour leur légèreté et leur résistance, ce qui les rend essentiels dans des domaines tels que l'aérospatiale et l'automobile pour améliorer l'efficacité énergétique et les performances.

Polyvalence : Les composites peuvent être adaptés à des besoins spécifiques en ajustant les types de fibres et de matrice, ce qui les rend adaptatifs à diverses applications.

Durabilité : Ils offrent une résistance élevée à la corrosion, ce qui les rend appropriés pour des environnements hostiles, notamment les industries marines et chimiques.

Innovation et design : Les composites permettent des designs innovants et complexes, ce qui ouvre la voie à de nouvelles solutions dans l'industrie.

Réduction des coûts à long terme : Bien que leur production initiale puisse être coûteuse, les matériaux composites peuvent réduire les coûts d'exploitation à long terme grâce à leur légèreté et à leur durabilité, en particulier dans l'aviation et l'automobile.

I.2 Définition des matériaux composites

Un composite est l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux non miscibles de nature différentes, et dont les qualités se complètent afin d'obtenir un matériaux hétérogène et fortement anisotrope dont les performances sont supérieures à celles de ses constituants de base, ou mieux encore, par effets de synergie. les matériaux composites ne sont pas alliés, mais associés [1] .

Un matériau composite nécessite l'association intime d'un moins deux composants : le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser (Figure I.1), ce qui introduit la notion d'un agent de liaison, l'interface assure la compatibilité renfort matrice, transmet les contraintes d'un constituant à l'autre sans déplacement relatif.

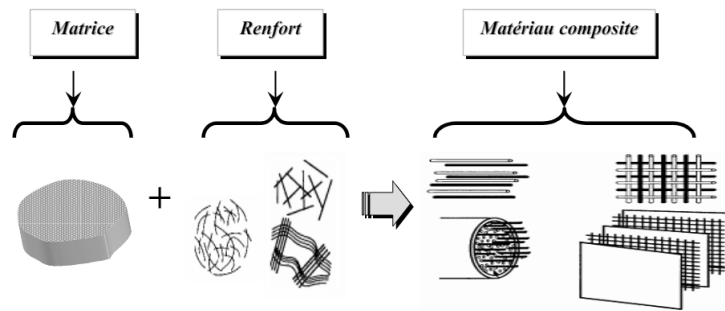


FIGURE I.1 – Constituants d'un matériau composite

Aujourd'hui, on peut diviser les matériaux composites en trois catégories principales en fonction de la nature de leur matrice :

1. **Les composites à matrice organique (CMO)** sont les plus couramment utilisés à grande échelle dans l'industrie.
2. **Les composites à matrice céramique (CMC)** sont réservés aux applications extrêmement exigeantes en termes de technologie et de température, telles que l'aérospatiale, le nucléaire, le militaire et les systèmes de freinage.
3. **Les composites à matrice métallique (CMM)** sont privilégiés par les concepteurs de l'industrie automobile, de l'électronique et des loisirs pour répondre à des besoins mécaniques spécifiques.

I.3 Les composants du matériau composite

Les matériaux composites sont généralement constitués de deux composants principaux :

La fibre : est la composante principale qui confère au matériau composite sa résistance et sa rigidité. Cette fibres peut être fabriquées à partir de divers matériaux. Il est généralement disposé de manière stratégique dans le matériau pour fournir des propriétés directionnelles spécifiques.

La matrice : est le matériau qui entoure et maintient les fibres en place. Elle peut être composée de résines polymères, de métaux et de céramiques. La matrice transfère les charges entre les fibres, protège les fibres contre l'usure et la corrosion, et confère au matériau composite ses propriétés particulières.

I.3.1 Les renforts

Ils sont de nature filamentaire, ils constituent l'armature ou le squelette du matériau composite à une fraction volumique de (30 à 70%). Ils sont destinés à améliorer ou assurer la tenue mécanique (rigidité, résistance à la rupture, à la traction) tel que cette dernière est proportionnelle au rapport longueur /diamètre (l/d). La figure I.2 présente les principaux matériaux de renfort [2] .

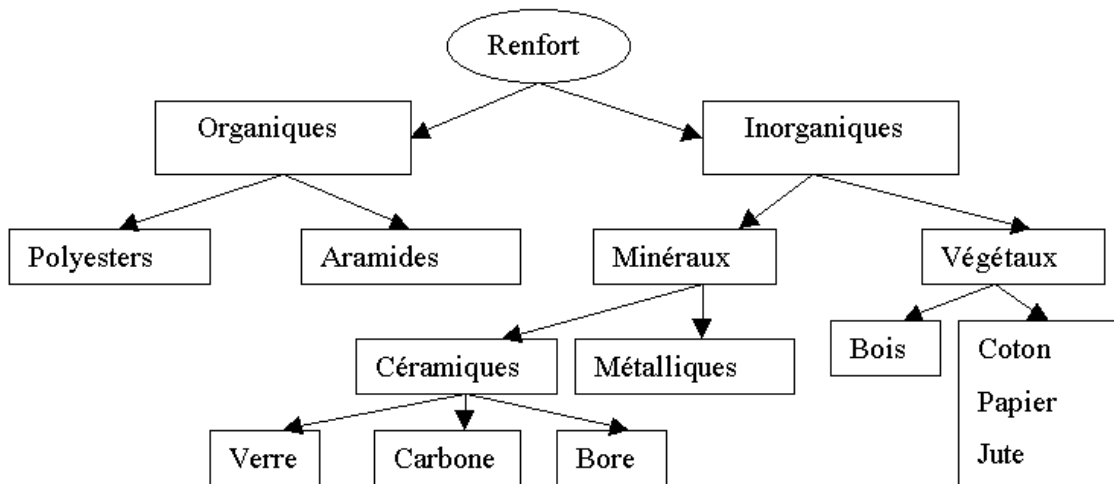


FIGURE I.2 – Principaux matériaux de renfort .

Parmi les diverses catégories de renforts, on peut citer :

❖ **Les fibres de verre** : sont à faible coût de production, et constituent le renfort le plus utilisé actuellement (bâtiment, nautisme et autres applications non structurales aéronautiques) [3]. Elles sont obtenues à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

On distingue trois types de fibres [4] :

1. **E** : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
2. **R** : pour les composites hautes performances ;
3. **D** : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).



FIGURE I.3 – Différent type de fibre de verre.

❖ **Le processus de fabrication des fibres de verre** : Leur fabrication se fait en général par étirage décrit par la figure I.4. Les oxydes minéraux constituant la matière première (silice, alumine etc ...) sont mélangés en proportion voulue suivant le type de fibre de verre désiré. Ce mélange est ensuite porté à très haute température (1550°C) afin d'être liquéfié pour être étiré à travers une filière sous forme de filaments de diamètres calibrés. Ces filaments isotropes sont ensimés pour optimiser l'adhésion de la matrice, puis assemblés pour former les fils, eux-mêmes stockés sous forme de bobine appelée gâteau.

Le gâteau est alors étuvé, pour éliminer l'eau résiduelle et pour stabiliser l'ensimage. Les fibres de verre ainsi obtenues sont amorphes, ce qui leur confère des caractéristiques mécaniques parfaitement isotropes. Cependant, leur faible module d'élasticité, ainsi que leur densité supérieure aux fibres de carbone limitent leur utilisation pour la fabrication de pièces structurales [3].

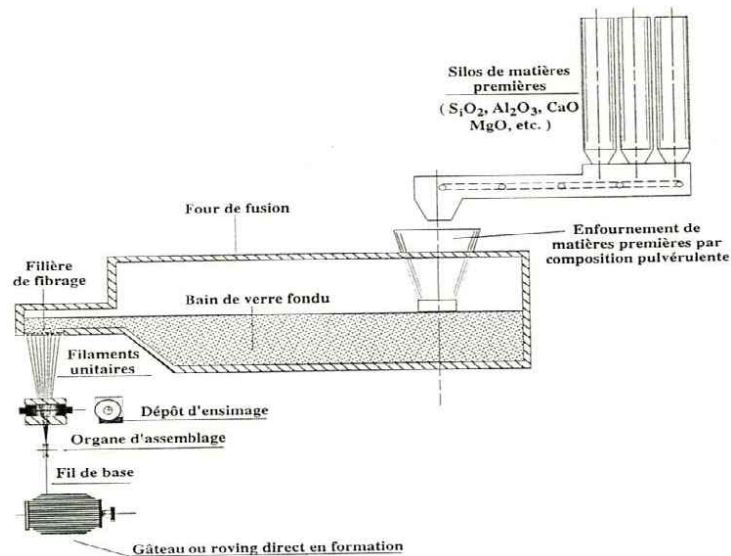


FIGURE I.4 – Description des différentes opérations du procédé mécanique d'étirage permettant la fabrication des fibres de verre.

Avantages

- **Légèreté** : Poids léger par rapport à la résistance ;
- **Résistance à la corrosion** : Résiste aux environnements corrosifs ;
- **Isolation thermique** : Excellente isolation thermique ;
- **Résistance mécanique** : Robuste et résistant ;
- **Transparence aux ondes électromagnétiques** : Transparent aux ondes électromagnétiques, utile dans diverses applications.

Limites

- Résistance en compression et en flexion limitée ;
- Fragilité en cas de chocs violents ;
- Adhérence variable à la matrice polymère ;
- Réactivité chimique limitée, nécessitant parfois des traitements de surface ;
- Coût relativement élevé par rapport à certains matériaux traditionnels.

❖ **Les fibres de carbone** : C'est les fibres les plus utilisées dans les applications hautes performances. On distingue deux types de fibres [4] :

1. **Fibres haute résistance (HR)** : pour une combustion de 1000° à 1500°C ;
2. **Fibres haut module (HM)** : pour une température de combustion de 1800° à 2000°C .



FIGURE I.5 – Fibre de carbone.

❖ **Le processus de fabrication des fibres de carbone :** Ces fibres sont généralement obtenues par pyrolyse d'un précurseur organique sous atmosphère contrôlée (figure I.6). Le plus utilisé de ces précurseurs est le poly acrylonitrile (PAN). Celui-ci est oxydé entre 200 et 300°C sous air ambiant puis carbonisé sous azote entre 800 et 1500°C. Il ne subsiste alors que la structure lamellaire hexagonale 2-D d'atomes de carbone. Les filaments dits à Haute Résistance (HR) de 7 micro-mètre de diamètre ainsi que ceux dits à Module Intermédiaire (IM) sont ainsi obtenus. Les filaments à haut module (HM) voire très haut module (THM) (5,5 micro-mètre de diamètre) subissent en revanche une étape supplémentaire de graphitisation autour de 3000°C, sous argon. Cette graphitisation entraîne une réorientation des réseaux hexagonaux et permet d'augmenter la rigidité des fibres [3].

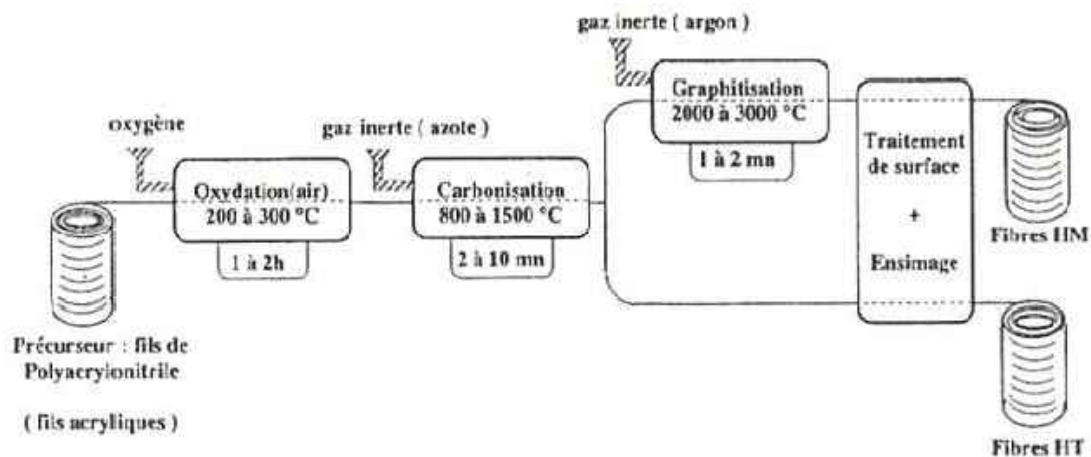


FIGURE I.6 – Schéma du principe de fabrication des fibres de carbone à base de PAN.

Avantages

- Faible densité.
- Dilatation thermique très faible ;
- Bonne propriété mécanique.

Limites

- Résistance en compression et en flexion limitée.

- Fragilité en cas de chocs violents ;
- Adhérence variable à la matrice polymère ;
- Réactivité chimique limitée, nécessitant parfois des traitements de surface ;
- Coût relativement élevé par rapport à certains matériaux traditionnels.

❖ **Les fibres céramiques** : Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions [5]. Quelques exemples de fibres céramiques :

- * Fibres de Carbure de Silicium ;
- * Fibres de Bore ;
- * Fibres de Bore carbure de silicium.



FIGURE I.7 – Fibre céramique.

Avantages

- Haute température de fonctionnement ;
- Résistance à la corrosion chimique ;
- Faible conductivité thermique ;
- Légèreté ;
- Résistance mécanique élevée.

Limites

- Fragilité intrinsèque ;
- Coût élevé de fabrication ;
- Difficulté de mise en forme ;
- Conductivité électrique nulle ;
- Limites de résistance à la flexion.

❖ **Les fibres d'aramides** : Les fibres dérivées des polyamides aromatiques, communément connues sous le nom commercial "Kevlar", sont parmi les plus célèbres. Le comportement des fibres d'aramide présente des similitudes avec celui des métaux, car elles sont élastiques sous de faibles charges, mais deviennent plastiques lorsqu'elles sont soumises à des contraintes élevées. Elles offrent un compromis intéressant entre les fibres

de carbone et celles à base de verre. De plus, elles possèdent une excellente résistance au feu. Cependant, lorsqu'elles sont utilisées pour renforcer des composites, elles montrent une faible résistance à la compression et à la flexion en raison de leur mauvaise adhérence aux résines.

Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes [4] :

■ **Les fibres bas module** : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;

■ **Les fibres haut module** : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.



FIGURE I.8 – une bobine de fibre d'aramide.

Avantages

- Haute résistance mécanique ;
- Elles sont légères ;
- Résistance à la corrosion ;
- Isolation thermique ;
- Résistance au feu.

Limites

- Prix élevé ;
- Adhésion difficile avec les résines ;
- Reprise d'humidité importante ;
- Tenue limitée en compression.

❖ Architecture des renforts

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée [4].

Il existe différentes géométries et textures de renforts :

➤ **Les unidirectionnels (UD)** : Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de

déséquilibre très grand.

Les tissus se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaire entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

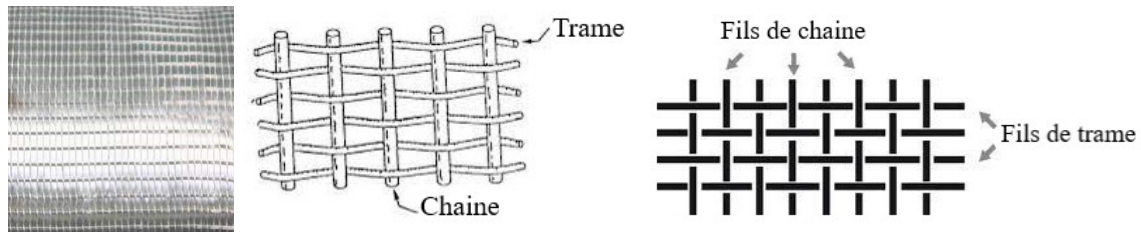


FIGURE I.9 – Les unidirectionnels.

➤ **Toile ou taffetas** : Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques (Figure (a)).

➤ **Serge** : Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-contre, un sergé 2/2 (Figure (b)).

➤ **Satin** : Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement (Figure (c)). Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique.

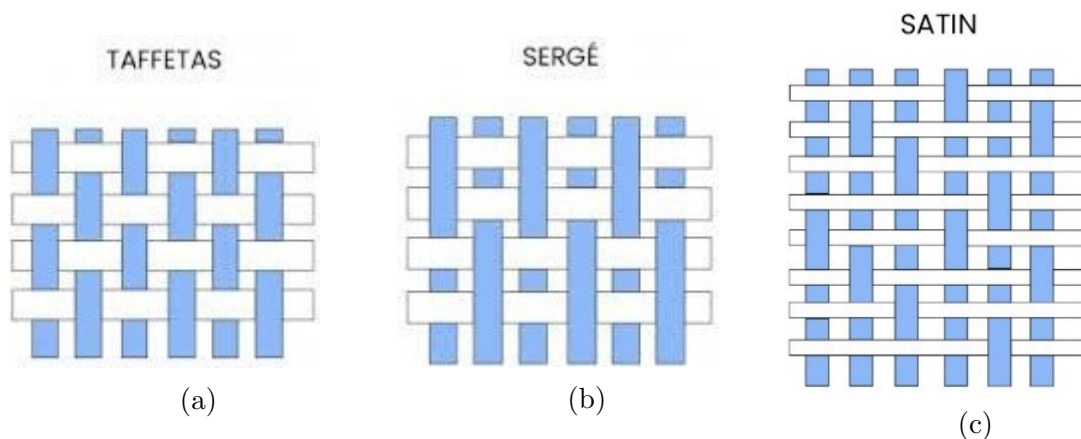


FIGURE I.10 – Les différentes texture de renforts

Étant donné que la déformation d'un tissu sur une surface plane est généralement complexe, des constructions d'armures bi ou tridimensionnelles sont également conçues pour des usages particuliers.

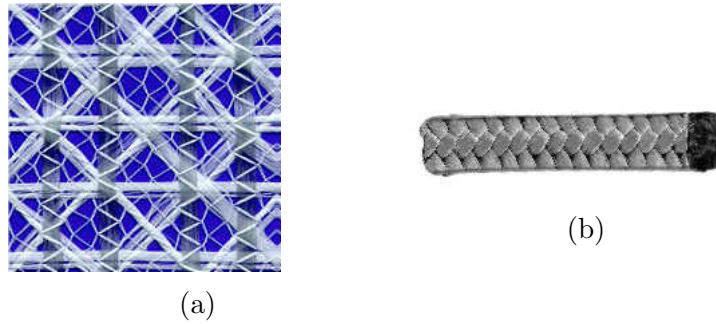


FIGURE I.11 – Tissus : (a) multiaxial, (b) : 3D ou tresse

Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides en tissant des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes de renforts de fibres différentes.



FIGURE I.12 – Tissu hybride carbone – aramide.

I.3.2 Les matrices

La matrice joue un rôle essentiel en transmettant les forces mécaniques au matériau de renfort tout en garantissant la protection de ce dernier contre les conditions environnementales telles que la corrosion, l'oxydation et l'humidité. Pour les composites à matrice organique (CMO), divers polymères peuvent être utilisés en tant que matrices. Ces résines synthétiques sont créées en reliant chimiquement de grandes molécules (formées par l'association de monomères) à l'aide de la chaleur et/ou de catalyseurs.

On peut distinguer trois catégories de ces matériaux plastiques [3] :

- ✿ Les polymères thermoplastiques (cristallins, semi-cristallins ou amorphes) ;
- ✿ Les polymères thermodurcissables (amorphes) ;
- ✿ Les élastomères (amorphes).

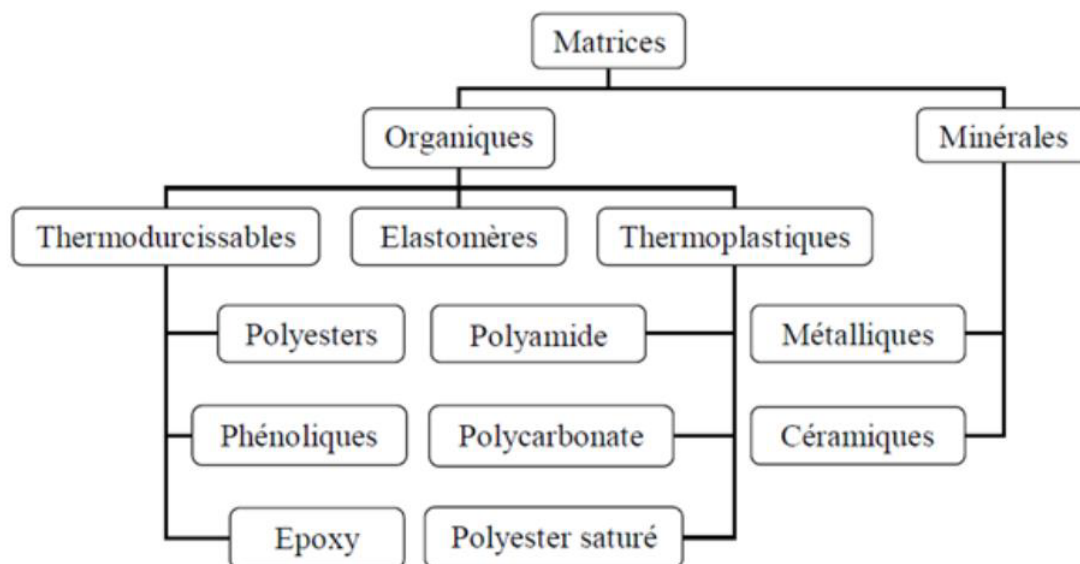


FIGURE I.13 – Différentes familles de matrice

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines TD « thermodurcissables » et les résines TP « thermoplastiques ». De plus, dans l’industrie automobile, il arrive parfois que l’on fasse appel à des élastomères. Le tableau I.1 présente les critères fondamentaux des matrices [6].

TABLE I.1 – Les critères fondamentaux pour les matrices thermoplastiques et thermodurcissables.

Matrice	Thermoplastique	Thermodurcissables
État de base	Solide prêt à l’emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	Illimité	Réduit
Mouillabilité des renforts	Difficile	Aisée
Moulage	Chauffage + Refroidissement	Chauffage continu
Cycle	Court	Long (polymérisation)
Tenue de choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	Réduite (Sauf nouveaux TP)	Meilleure
Chute et déchets	Recyclable	Perdus ou utilisés en charges
Conditions de travail	Propres	Émanations pour "méthode humide"

(a) Résines thermoplastiques (TP)

À l’état initial, les thermoplastiques démontrent de bonnes propriétés mécaniques. Leur résistance mécanique et thermique ainsi que leur stabilité dimensionnelle s’améliorent significativement lorsqu’ils sont renforcés par des fibres courtes. Cependant, il existe une

certaine confusion dans l'interprétation du terme "composite", avec certains acteurs de l'industrie excluant les thermoplastiques renforcés de fibres courtes, bien que ces derniers représentent jusqu'à 90% des composites à matrice thermoplastique. Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont [6] :

- * Les polyamides (PA) 6, 6-6, 12;
- * Les poly téréphtalates éthylénique (PET) et butylénique (PBT);
- * Les polycarbonate (PC);
- * Les polyoxides de phénylène (PPO ou PPE);
- * Les polyoxyméthylène (POM);
- * Le polypropylène (PP);

D'autres résines TP commencent à être utilisées pour leurs propriétés de thermo-stabilité (tenue thermique supérieure à 200°C) et de bonne tenue mécanique :

- * Le polyamide-imide (PAI);
- * Le polyéther-imide (PEI);
- * Le polyéther-sulfone (PES);
- * Le polyéther-éther-cétone (PEEK).

TABLE I.2 – Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques non renforcées.

Matrice "TP"	Masse Spécifique (Kg/dm ³)	Résistance à la traction (GPa)	Module de flexion (GPa)	Tenue à la chaleur continue (°C)
PP	1.1-1.2	20-30	1-1.6	85-115
PBT	1.5	45-55	2.2-2.6	120
PET	1.6	55-75	2-2.2	105-120
PRO	1.3	55-65	2.4-2.6	80-105
POM	1.6	60-70	7-9	95-105
PA	1.3-1.4	60-90	6-9	80-120
PAI	1.3-1.4	195	4.9	275
PEI	1.5	105	3	170
PES	1.6	85	2.6	180
PEEK	1.5	100	3.7	>240

(b) Résines thermodurcissables (TD)

Les résines thermodurcissables ont la capacité de subir une transformation irréversible, passant ainsi de l'état liquide à l'état solide. Elles se caractérisent par leurs excellentes propriétés mécaniques et leur faible densité. Il convient de noter que ces résines ne peuvent être façonnées qu'une seule fois [7].

Les résines thermodurcissables les plus couramment utilisées comprennent les polyesters instaurés, les vinylesters, les résines époxy, et les résines phénoliques, chacune ayant des propriétés spécifiques. Les polyuréthanes sont également utilisés pour leur faible viscosité facilitant le moulage. D'autres résines thermodurcissables, comme le silicone

et les poly-imides, trouvent des applications particulières en raison de leurs propriétés électriques, thermiques et chimiques. En Europe, les composites à matrice thermodurcissable (TD) représentent la majeure partie, soit 70%, de l'ensemble des composites transformés [6] .

TABLE I.3 – Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables non renforcées.

Matrice TD	Masse spécifique (Kg/dm ³)	Résistance à flexion (GPa)	Module de flexion (GPa)	Tenue à la chaleur continue (°C)
Polyester	1.2	50-65	3	120
Vinyl-ester	1.15	70-80	3.5	140
Phénolique	1.2	40-50	3	120-150
Epoxyde	1.1-1.4	50-90	3	120-200
Polyuréthane	1.1-1.5	20-50	1	100-120
Poly-imide	1.3-1.4	30-40	4	250-300

I.3.2.1 Principales combinaisons de résines et de renforts.

Le tableau I.4 présente une synthèse des combinaisons matrices/renfort les plus couramment utilisées donnant lieu à des composites hautes performances ou grande diffusion .

On notera que les composites hautes performances (HP) se distinguent essentiellement des composites grande diffusion (GD) par leurs meilleures propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la traction) et leur coût plus élevé.

TABLE I.4 – Synthèse de l'utilisation des résines et renforts.

Résines		Fibres de renfort				
		Verre E	Verre D	Verre R	Carbone	Aramide
Thermodurcissables	Polyesters	GD	GD			
	Phénoliques	GD				
	Polyuréthannes	GD				
	Epoxy		HP	HP	HP	HP
Thermoplastique	Polypropylènes	GD		HP		
	PA 6 et 6-6	GD		HP		
	PA 12, PEEK			HP	HP	HP

Dans le cadre de notre travail, nous avons porté notre attention sur les composites utilisant une résine de type polyester instauré.

I.3.2.2 Définition du polyester instauré

Il s'agit de la résine la plus fréquemment utilisée dans les applications de composites grand public. Il s'agit d'une résine de polyester instauré contenant généralement du

styrène en tant que monomère, qui subit une réticulation à température ambiante grâce à l'ajout d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Ce processus fait passer la résine d'un état initial visqueux liquide à un état de gel, puis à un état solide non-fondant.

La réaction est exothermique, ce qui signifie que la température de la résine augmente progressivement depuis l'état de gel jusqu'à atteindre un maximum, pour ensuite redescendre lentement à la température ambiante. La vitesse de durcissement dépendra de plusieurs facteurs, notamment la réactivité de la résine, la géométrie de la pièce à fabriquer (son épaisseur, par exemple), ainsi que la nature et la quantité des catalyseurs utilisés. Plus la courbe de température en fonction du temps se rapproche de la verticale, plus le durcissement sera rapide, réduisant ainsi le temps nécessaire dans le moule.

Il existe différents types de résines :

- * **Orthophtalique** : la plus courante ;
- * **Isophtalique** : qui donne une meilleure tenue à l'humidité ;
- * **Chlorée** : apportant une auto extinction ;
- * **Bisphénol** : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

☆ Caractéristiques

TABLE I.5 – Caractéristiques de la matrice polyester instauré.

Matrice	P (Kg/m ³)	E (MPa)	G (MPa)	N	σ (MPa)	A	$\alpha 10^{-5}$ °C ⁻¹	T_{\max} °C
Polyester insaturé	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	8	60 à 200

☆ Avantages

- * Bonne accroche sur fibres de verre ;
- * Facilité de mise en œuvre ;
- * Capacité à supporter des températures élevées (150°C) ;
- * Transparence ;
- * Bonne résistance chimique ;
- * Prix réduit.

☆ Inconvénients

- * Risque d'inflammabilité (à l'exception des résines chlorées) ;
- * Durée de stockage limitée en pot ;
- * Emission de styrène ;
- * Retrait important (6 à 15 %) ;
- * Tenue vapeur et eau bouillante.

I.3.3 Les charges et les additifs

*** Les charges**

Les composites peuvent être renforcés par l'ajout d'un autre matériau sous forme de petites particules, appelées charges. L'objectif de ces charges est de modifier les propriétés du produit, telles que la dureté de surface, la résistance à la flexion ou aux chocs, la réduction du pouvoir calorifique, l'amélioration de la résistance au feu, et souvent la réduction du coût de production. Les charges les plus couramment utilisées comprennent la poudre de carbonate de calcium (craie broyée), le kaolin, la silice, le mica, l'hydrate d'alumine et les micro-billes de verre.

*** Les additifs**

Un additif d'une grande importance est l'agent d'interface, qui assure la cohésion et l'adhérence entre les différents composants. Cet agent est généralement appliqué sur les fibres de renfort (comme l'ensimage du verre) ou sur les charges (comme le carbonate de calcium enrobé).

Les additifs sont présents en petites quantités et jouent les rôles suivants :

- ✓ Lubrifiants et agents de démoulage ;
- ✓ Pigments et colorants ;
- ✓ Agents anti-retrait ;
- ✓ Agents anti-ultraviolets.

I.3.4 Adhésion renforts / matrices

Le choix des composants ne se limite pas à sélectionner la meilleure matrice et la meilleure fibre. Il est impératif que l'adhérence entre les fibres et la matrice soit de qualité suffisante pour que les propriétés du matériau composite résultant surpassent celles de ses constituants individuels.

Il est à noter que les fibres de carbone développent une bonne adhérence aux matrices époxy grâce à un traitement à l'oxygène. En revanche, les fibres d'aramide, en raison de leur inertie chimique, ont du mal à s'associer avec des matrices organiques. Enfin, les fibres de verre, après humidification, démontrent une bonne adhérence inter faciale avec toutes les matrices organiques.

Sur le plan physico-chimique, l'adhérence entre les fibres (carbone ou verre) et la matrice (époxy) est généralement le résultat de liaisons covalentes, qui représentent le mécanisme de liaison le plus solide.

I.4 Architecture des matériaux composites

L'ensemble des méthodes de fabrication met en évidence l'importance de la conception des pièces en matériaux composites, que ce soit par :

- ◆ Surface : plaques, coques ;
- ◆ Stratification de couches successives.

I.4.1 Les stratifiés à base de tissus unidirectionnels

La stratification est une autre structure couramment observée dans les composants en matériaux composites. Dans un stratifié, les fibres sont disposées en fines couches, généralement de quelques dixièmes de millimètre, appelées plis, qu'ils soient constitués de fils ou de tissus unidirectionnels. La direction des fibres est décalée d'une couche à l'autre, et ces couches sont empilées les unes sur les autres. Après la mise en forme, ces couches seront solidement reliées les unes aux autres grâce à la matrice.

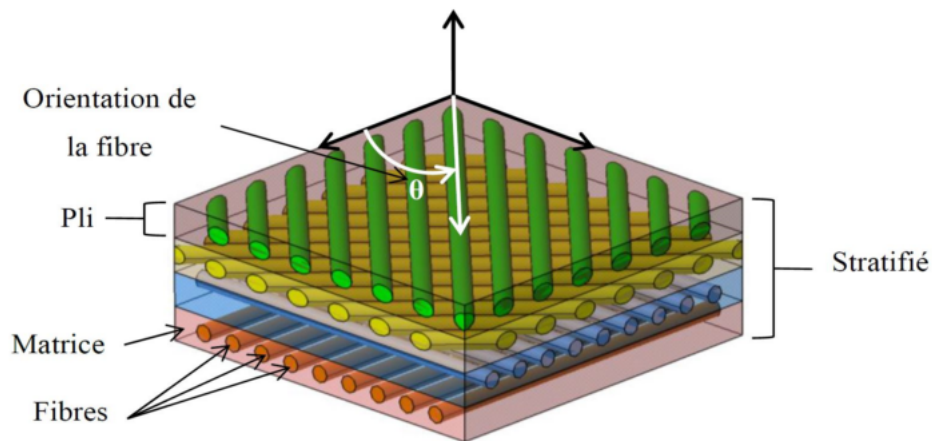


FIGURE I.14 – Exemple du plan du drapage d'un composite stratifié.

Il existe diverses catégories de stratifiés [8]

- ◆ Stratifiés symétriques ;
- ◆ Stratifiés hybrides ;
- ◆ Séquences ;
- ◆ Stratifiés symétriques en miroir.

*La loi des mélanges pour les composites stratifiés

Les déformations des matériaux homogènes et isotropes peuvent être décrites assez simplement à l'aide des modules d'élasticité et des contraintes de déformation, qui sont les propriétés de base des matériaux bruts. Dans le cas des composites, chaque élément joue un rôle différent et c'est l'association de ces propriétés qui confère au matériau final ses caractéristiques propres. Bien que ces caractéristiques finales soient le résultat d'interactions complexes entre le renfort et la matrice, il est possible d'en donner une estimation

simple à l'aide de la Loi des Mélanges appliquée aux composites stratifiés [9] :

$$P_c = \rho_c \cdot V_c = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \quad \text{ou} \quad V_f + V_m = 1 \quad (\text{I.1})$$

➔ Avec

- P_c : poids estimé du composite ;
- ρ_c : masse volumique du composite ;
- V_c : fraction volumique du composite ;
- ρ_f : masse volumique de la fibre ;
- V_f : fraction volumique de fibres ;
- ρ_m : masse volumique de la matrice ;
- V_m : fraction volumique de matrice.

Il s'agit de valeurs théoriques, en réalité la présence de vides fait que $V_f + V_m \leq 1$.

Par exemple, le module d'élasticité en traction peut être estimé en se basant sur les modules respectifs de la fibre et de la matrice.

$$E_{c,t} = E_{f,t} \cdot V_f + E_{m,t} \cdot V_m \quad (\text{I.2})$$

➔ Avec :

- $E_{c,t}$: module d'élasticité en traction estimé du composite ;
- $E_{f,t}$: module d'élasticité en traction de la fibre ;
- V_f : fraction volumique de fibre ;
- $E_{m,t}$: module d'élasticité en traction de la matrice ;
- V_m : fraction volumique de matrice.

Cette équation peut être modélisée par un système de ressorts associés en parallèle (figure I.15)

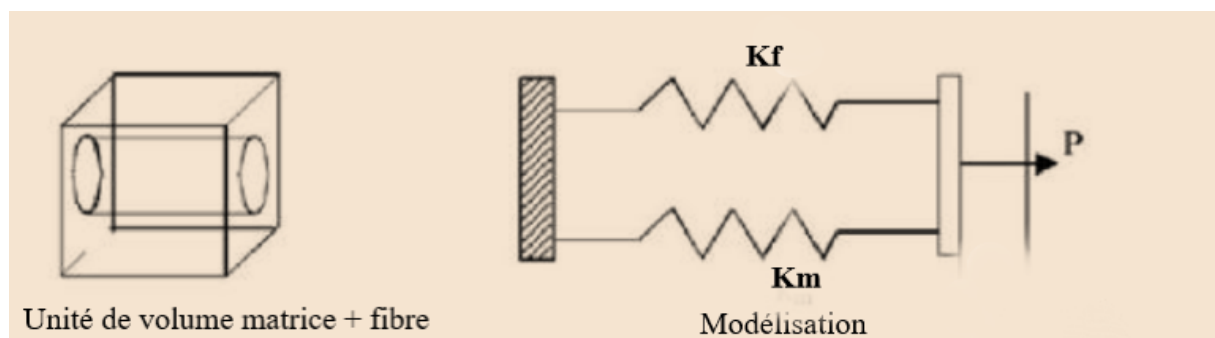


FIGURE I.15 – Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié.

Dans le cas du module d'élasticité en flexion, le modèle correspond à une association en série des ressorts (Figure I.16). L'équation correspondante serait alors :

$$E_{c,f} = \frac{E_{f,f} \cdot E_{m,f}}{E_{f,f} \cdot V_m + E_{m,f} \cdot V_f} \quad (\text{I.3})$$

➔ Avec :

- $E_{c,f}$: module d'élasticité en flexion estimé du composite ;
- $E_{f,f}$: module d'élasticité en flexion de la fibre ;
- $E_{m,f}$: module d'élasticité en flexion de la matrice ;
- V_f : fraction volumique de fibre ;
- V_m : fraction volumique de matrice.

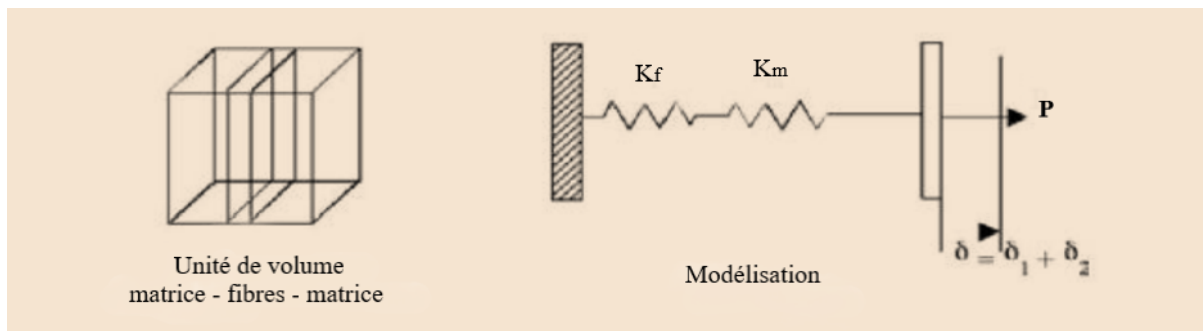


FIGURE I.16 – Modélisation par un système de ressorts des propriétés en flexion d'un composite stratifié.

Ces deux équations permettent de déterminer les bornes supérieure ($E_{c,t}$) et inférieure ($E_{c,f}$) au module d'élasticité du composite, modélisées respectivement par une courbe linéaire et par une hyperbole. Le module réel du composite se situe alors entre ces deux courbes.

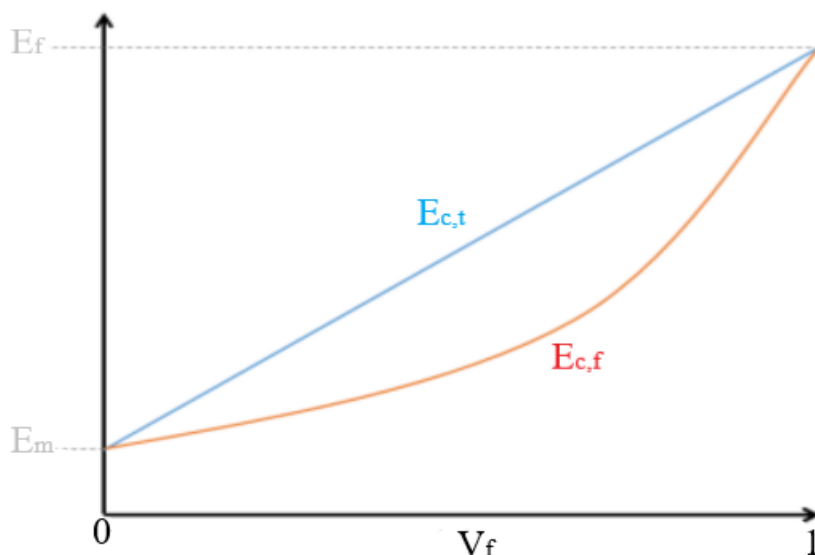


FIGURE I.17 – Modélisation des bornes d'après la Loi des Mélanges.

I.4.2 Composites sandwiches

Les matériaux composites sandwich sont des structures composées de trois couches principales : deux couches extérieures, généralement appelées "peaux" ou "faces", et une couche centrale, appelée "âme" ou "noyau" [5].

Ces matériaux sont conçus de manière à combiner les avantages de chaque couche pour obtenir une structure légère, résistante et rigide.

Peaux (Faces) : Les peaux sont les couches extérieures du matériau composite sandwich. Elles sont généralement fabriquées à partir de matériaux composites, tels que la fibre de carbone, la fibre de verre ou d'autres renforts composites, associés à une résine. Les peaux sont conçues pour offrir une résistance mécanique élevée et une rigidité dans la direction plane de la structure.

Âme (Noyau) : L'âme est la couche centrale du matériau composite sandwich. Elle peut être fabriquée à partir de différents matériaux, tels que du nid d'abeille en aluminium ou en plastique, des matériaux ondulés, de la mousse structurale, ou d'autres matériaux légers et résistants. L'âme est choisie en fonction des besoins de la structure, notamment en termes de rigidité, de légèreté et de capacité à absorber l'énergie.

Les avantages des matériaux composites sandwich résident dans leur capacité à combiner la résistance des peaux extérieures avec la légèreté de l'âme centrale, ce qui donne naissance à une structure légère et rigide. Ils sont largement utilisés dans diverses applications, notamment dans l'aérospatiale, l'industrie automobile, la construction navale et la construction de structures légères, où la réduction du poids tout en maintenant la solidité est essentielle [10].

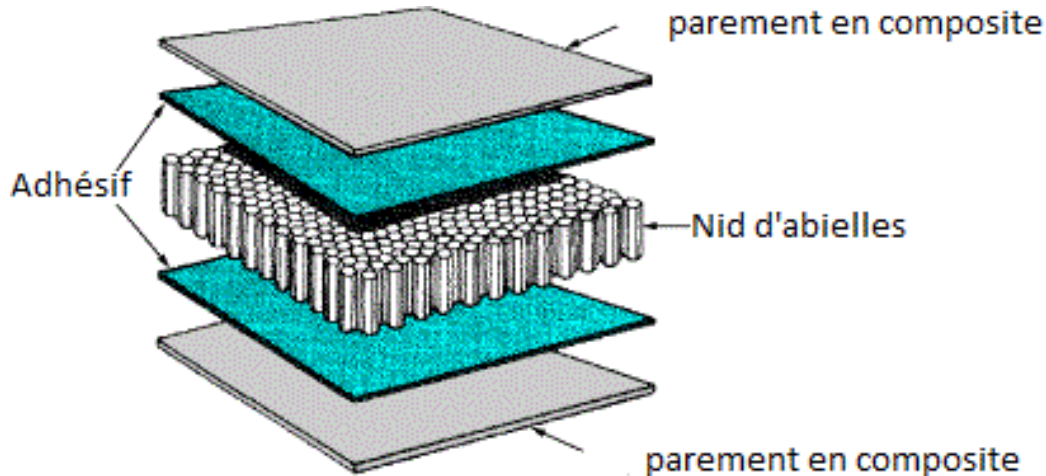


FIGURE I.18 – Un sandwich en nid d'abeille

I.5 Procédé de mise en œuvre

Les procédés de fabrication revêtent une importance majeure dans le domaine des composites, car chaque étape a un impact durable sur le produit final. De nombreuses méthodes de fabrication ont été élaborées pour satisfaire aux exigences spécifiques, et le choix de ces méthodes dépend principalement des propriétés mécaniques requises, de la géométrie du produit et de la quantité de production. Plusieurs techniques de mise en œuvre sont disponibles, notamment [11] :

- ✓ Technologies manuelles de transformation ;
- ✓ Procédés de transformation par moulage ;
- ✓ Procédé de transformation en continu ;
- ✓ Procédés de fabrication des formes de révolution .

Dans notre cas, nous avons employé l'une des techniques manuelles de mise en œuvre, qui est le moulage au contact.

I.5.1 Les technologies dites en moule ouvert

❖ Moulage au contact

★ Principe

Méthode manuelle pour la fabrication de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans application de pression [6]. Cette méthode de mise en œuvre est la première à avoir été employée dans le moulage des résines de polyesters in-saturés renforcées [12]. Il commence par le nettoyage du moule avec une cire servant d'agent de démoulage, suivi de l'application d'une fine couche de résine colorée en surface appelée gel-coat. Cette étape est suivie d'un temps de durcissement à température ambiante. Ensuite, le renfort et la couche de résine sont successivement déposés sur un moule ouvert. À chaque couche déposée, le renfort est saturé de résine à l'aide d'un rouleau ou d'un pinceau. L'ensemble est maintenu dans cet état jusqu'à la gélification complète, puis le démoulage a lieu une fois que la polymérisation est terminée [11].

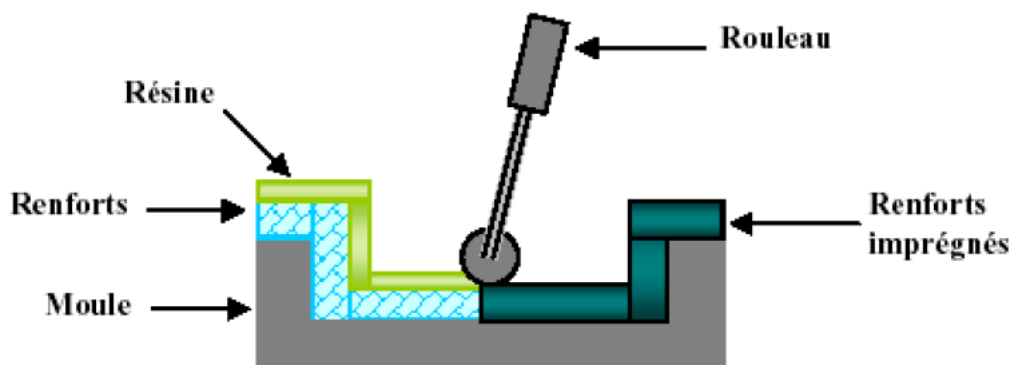


FIGURE I.19 – Principe du moulage au contact.

★Matières premières

- * **Renforts** : mats, tissus de fibre de verre, de carbone ou d'aramide (taux de renfort pondéral de 25 à 45 % dans le cas du verre) ;
- * **Résines** : polyesters, époxy, phénoliques (résols), vinylesters ;
- * **Divers** catalyseur, accélérateur, charges, pigments, agent de démoulage, acétone.

★Matériel

- * **Moule** : simple coque généralement en composite, éventuellement en plusieurs éléments assemblés ;

- ★ **Outillages à mains :** ciseaux, pinces, ébulleurs, tranchets, pistolet à peinture ou gel-coateuse.

★Le domaine d'application

- ★ Piscine ;
- ★ Nautisme ;
- ★ moi ittid Génie chimique ;
- ★ Transport, carrosserie (petites séries) ;
- ★ Bâtiment, travaux public (coffrage).

★Cas d'utilisation

- ★ Procédé pour petites séries : de 1 à 1000 pièces / an ;
- ★ Pièces de grandes à très grandes dimensions ;
- ★ Revêtement sur supports divers et in situ .

★Avantages

- ★ Grande variété de formes possibles ;
- ★ Surface lisse avec un gel-coat (aspect esthétique, résistance à la corrosion) ;
- ★ Propriétés mécaniques allant de moyennes à bonnes ;
- ★ Investissement minimal en équipement spécifique ;
- ★ Pas de limites dimensionnelles ;
- ★ Moules simples, économiques et rapides à produire en interne.

★ Limites

- ★ Seule une face présente une finition lisse ;
- ★ Nécessité de finition (détourage, perçage, etc.) ;
- ★ La qualité dépend des compétences de la main-d'œuvre ;
- ★ Un espace de travail considérable est nécessaire ;
- ★ La production par moule est à un rythme relativement faible ;
- ★ Les conditions de travail peuvent être de qualité médiocre.

❖ Moulage par projection simultané

Procédé, qu'il soit manuel ou automatisé à l'aide de robots, qui permet la fabrication de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans nécessité de pression. Les matières premières sont traitées à l'aide d'une machine désignée comme une machine de projection qui comprend :

- ✧ Un dispositif de coupe - projection du renfort (roving) ;
- ✧ Un ou deux pistolets projsimultanément la résine .

Les fils coupés et la résine sont projetés sur la surface du moule puis compactés et ébullés à l'aide de rouleaux et d'ébulleurs. La résine pré accélérée est catalysée en continu lors de sa projection [6].

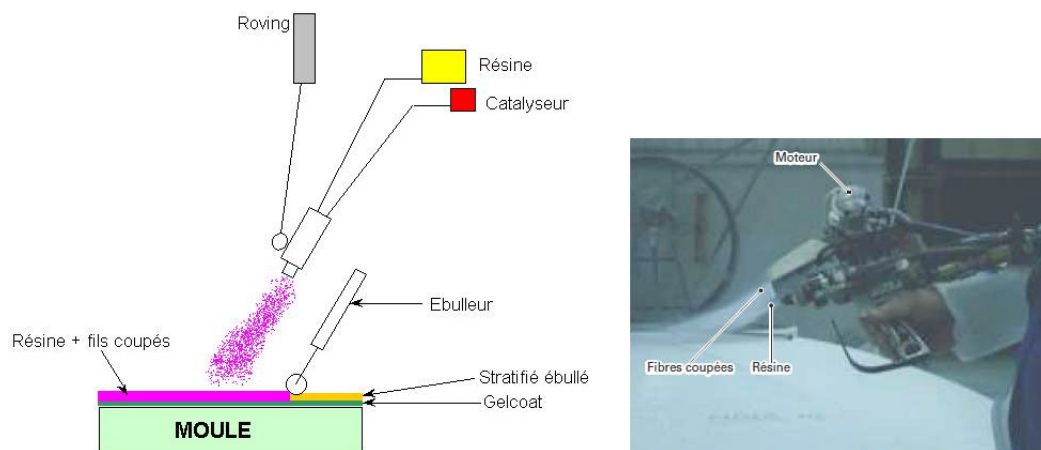


FIGURE I.20 – Principe du moulage au contact.

★ Cas d'utilisation

- ★ Production de pièces de moyennes à grandes dimensions ;
- ★ Recherche de réduction des coûts par rapport au contact ;
- ★ Petite et moyenne série.

★ Avantages

- ★ Moules simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne ;
- ★ Investissements très modérés ;
- ★ Travail simplifié, suppression de la mise en forme obtenue directement par la projection ;
- ★ Très larges possibilités de forme et dimensions.

★ Limites

- ★ La qualité dépend des compétences de la main-d'œuvre ;
- ★ Une seule face présente une finition lisse ;
- ★ Les conditions de travail peuvent être très médiocres en l'absence d'aménagements nécessaires ;
- ★ Propriétés mécaniques de niveau moyen.

I.5.2 Les technologies dites en moules fermé

❖ Moulage par injection de résine

Le procédé de moulage implique l'injection sous pression de résine pour saturer un renfort positionné à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule extrêmement solide et hermétiquement fermé. L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation. La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées. Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées [8] .

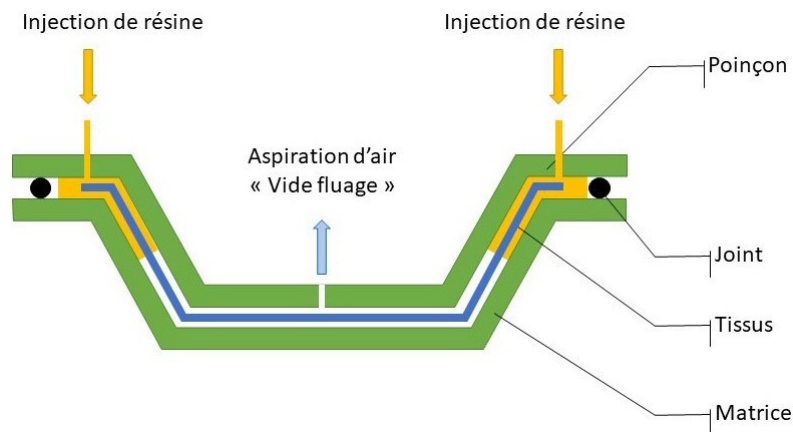


FIGURE I.21 – Principe du moulage par injection de résine.

❖ Moulage par compression

*Moulage par compression à chaud de résine

Ce processus exige l'utilisation d'une presse hydraulique et d'un moule métallique chauffé à une température généralement située entre 80 et 150°C, ainsi que l'incorporation du renfort (sous forme de mat à fils coupés, fils continus, tissus ou préformes). Le moule est ensuite fermé sous une pression de 10 à 50 bars. Cette méthode de moulage permet d'obtenir une proportion significative de renfort, ce qui se traduit par des pièces possédant de bonnes propriétés mécaniques. Le choix de la presse dépend des dimensions des pièces à fabriquer.

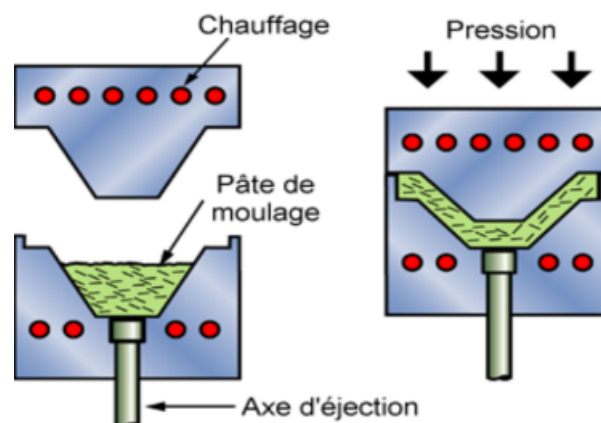


FIGURE I.22 – Principe du moulage par compression à chaud de résine.

Ce procédé est utilisé pour les grandes séries de production, 15 à 30 pièces par heure.

*Moulage par compression à froid de résine

En utilisant une presse composée d'un moule et d'un contre-moule solides fabriqués à partir de matériaux composites à température ambiante, le renfort (mat, mat de fils continue) est disposé sur la partie inférieure du moule, suivi de l'ajout de résine. La fermeture du moule sous une pression de 2 à 4 bars entraîne la distribution uniforme de

la résine dans l’empreinte et l’imprégnation complète du renfort. Le durcissement de la résine est progressivement accéléré par l’augmentation de la température du moule due à l’exo-thermie de la réaction, permettant ainsi un démoulage rapide.

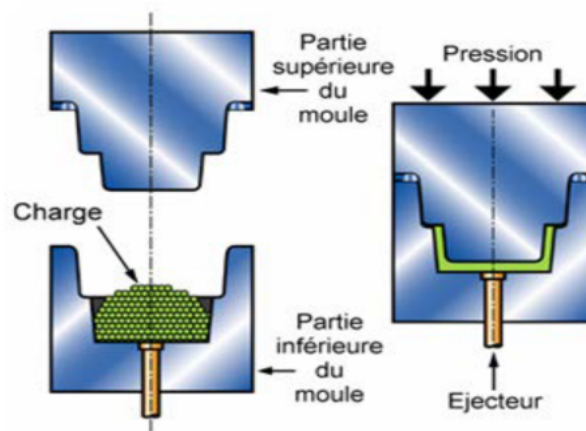


FIGURE I.23 – Principe de moulage par compression à froid de résine.

Ce procédé est approprié pour la fabrication en série de moyenne en quantités allant de 500 à 5000 unités.

❖ Moulage par injection de mélange

En général, cette technique est employée pour la fabrication de matériaux connus sous le nom de "plastiques renforcés" (voir la figure I.24) [4]. Elle est particulièrement adaptée à la production en très grande série. Dans ce processus, un mélange est préparé en utilisant un malaxeur, comprenant de la résine, des charges, divers additifs, ainsi que des renforts tels que des fibres courtes ou des sphères (billes), etc.

Le composé ainsi obtenu est moulé à chaud (à des températures de l’ordre de 130 à 150°C), principalement par injection, entre un moule et un contre-moule en acier usiné. La pression de fermeture du moule se situe généralement entre 50 et 100 bars [8] .

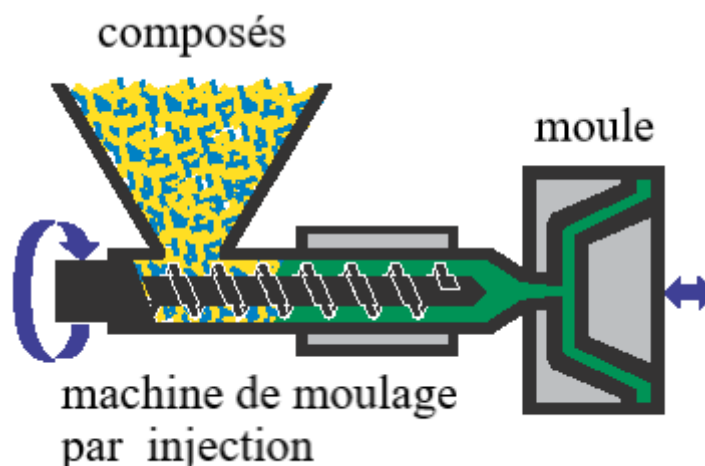


FIGURE I.24 – Principe du moulage par injection de mélange.

❖ Moulage sous vide

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant les caractéristiques des pièces [4]. Il combine l'utilisation du vide et de la pression atmosphérique. Après l'application du gel coat, le renfort est positionné sur un moule rigide, puis la matrice est versée. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, ce qui a pour effet d'étaler la résine et de retirer les bulles d'air. Il est également possible d'injecter la résine en utilisant l'aspiration résultante du vide [8].

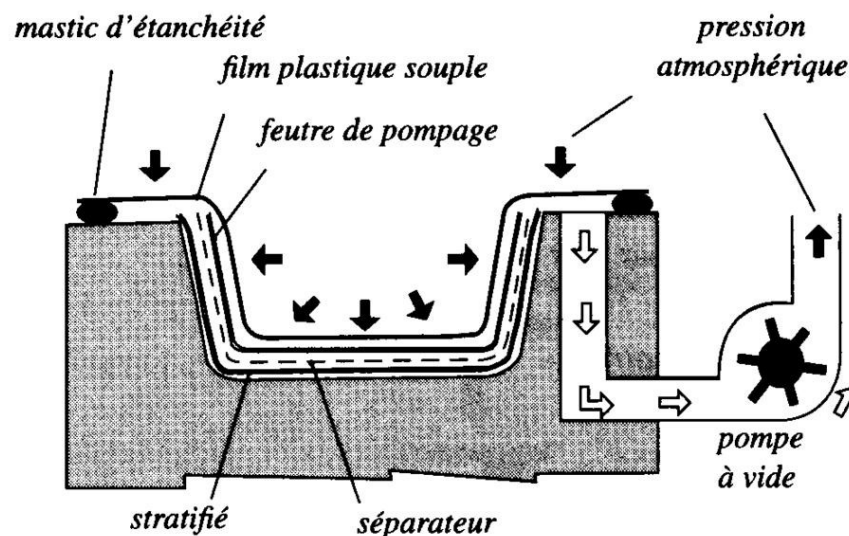


FIGURE I.25 – Principe de moulage sous vide.

Ce procédé de moulage est adapté à la production de pièces en petites et moyennes séries, offrant également la possibilité d'obtenir des propriétés mécaniques de qualité et un bel aspect surface.

I.6 Conclusion

En conclusion, ce chapitre nous a permis de découvrir les matériaux composites, des matériaux de pointe qui offrent une combinaison unique de légèreté, de résistance et de flexibilité. Nous avons exploré les différents composants des composites, à savoir les matrices et les renforts, ainsi que les charges et additifs qui améliorent leurs performances. Nous avons également examiné les principaux procédés de fabrication des composites, en mettant en évidence leurs avantages et leurs inconvénients.

Malgré le développement et la maîtrise de nombreuses méthodes de fabrication par les industriels, certaines opérations d'usinage demeurent essentielles dans les processus de production, notamment le perçage et le détournage, qui sont responsables de la découpe et de l'assemblage des pièces. Dans le chapitre suivant de notre étude, nous nous concentrerons sur l'opération de perçage et en analyserons les détails.

CHAPITRE II

Perçage des matériaux composites

II.1 Introduction

Le perçage des matériaux composites est une étape cruciale dans la fabrication de composants utilisés dans divers secteurs industriels tels que l'aérospatiale et l'automobile. En raison de la structure complexe et hétérogène de ces matériaux, le perçage présente des défis uniques, notamment le délaminage, l'usure des outils et la génération de défauts. Ce chapitre explore les différentes techniques de perçage, les conditions optimales de coupe et les types d'outils adaptés pour minimiser les dommages. Il aborde également les mécanismes d'endommagement, l'analyse des fissurations et la caractérisation des défauts afin d'optimiser les performances et la qualité des produits finis.

II.2 Définition de perçage

Le perçage est un processus d'usinage qui consiste à créer des trous ou des ouvertures dans un matériau en utilisant un outil de coupe, généralement un foret ou une mèche. Ce processus est couramment utilisé dans divers domaines de l'industrie pour la fabrication de pièces et d'assemblages mécaniques, ainsi que dans d'autres applications telles que la construction, la menuiserie et l'électronique. Le perçage peut être effectué manuellement à l'aide d'une perceuse ou de manière automatisée à l'aide de machines-outils, et il peut impliquer différents types de matériaux, y compris les métaux, les plastiques, les bois, les composites, et d'autres matériaux. Le résultat du perçage est la création d'un trou précisément dimensionné dans le matériau, souvent dans le but de permettre l'assemblage de pièces ou le passage de câbles, de vis ou d'autres éléments [21].

II.3 Type du perçage des matériaux composites

Le perçage des matériaux composites peut être réalisé de différentes manières en fonction des besoins spécifiques de l'application et des propriétés du matériau composite en question. Voici quelques types :

II.3.1 Perçage par enlèvement de la matière

Le perçage représente l'opération d'enlèvement de matière la plus couramment utilisée dans le domaine de l'usinage des matériaux composites. Il est facile à utiliser mais difficile à maîtriser.

Le processus de perçage implique la découpe des fibres, ce qui peut réduire la résistance mécanique du matériau et entraînera des dommages dans la zone adjacente à la zone usinée, tels que l'arrachement de fibres ou le délaminage, qu'il soit interne ou externe. Par conséquent, pour minimiser l'incidence de ces défauts et leur étendue, il est essentiel d'appliquer des techniques d'usinage spécialement adaptées aux caractéristiques des composites, incluant la morphologie des outils et des méthodologies appropriées. De plus, il

est crucial de développer des méthodes de contrôle spécifiques pour garantir la qualité du processus d'usinage [23].

Parmi les difficultés propres au perçage et à son étude, il peut être cité [24] :

- * Une évolution importante et progressive de la vitesse de coupe (V_c) selon la position sur l'arête de coupe ;
- * Une évolution de la géométrie de l'outil avec le rayon ;
- * Une coupe oblique tridimensionnelle ;
- * Un usinage en espace confiné qui empêche l'évacuation des copeaux et de la chaleur générée dans la zone de coupe.

Cela souligne la problématique inhérente à la conception des outils de perçage, où il est nécessaire de trouver un équilibre délicat entre la rigidité de la structure de l'outil et la nécessité de gérer l'évacuation des copeaux générés. En conséquence, la gestion de la génération et de l'évacuation des copeaux lors du perçage devient un défi complexe qui entrave la maîtrise et la fiabilité de cette opération. Pour parvenir à une optimisation du processus et de la qualité des résultats obtenus, il est impératif de posséder une compréhension approfondie et d'effectuer une modélisation précise des mécanismes de coupe impliqués dans l'opération de perçage.

Cependant, un autre défi majeur réside dans le confinement de la zone de coupe, ce qui rend difficile l'observation des phénomènes tels que les efforts appliqués et les températures générées. Dans ce contexte, l'accès à la température ne peut se faire que par des mesures indirectes réalisées autour de la zone de coupe, accompagnées d'une analyse thermo-mécanique complexe. L'étude des efforts nécessite des mesures globales lors du perçage à travers toute la matière ou des mesures partielles lors du perçage de tubes ou de la création d'avant-trous, par exemple. La nature évolutive de la géométrie de l'outil et les variations significatives de la vitesse de coupe le long de l'arête de coupe contribuent à une distribution inégale de l'effort axial, avec une concentration importante au centre de l'outil sur les premiers millimètres de rayon.

Dans l'ensemble, l'étude et la modélisation des processus de coupe en perçage sont complexes. Pour simplifier la modélisation de l'opération de perçage, il est courant d'adopter une approche qui suppose que chaque segment de l'arête de l'outil travaille en mode de coupe orthogonale ou oblique.



FIGURE II.1 – Perçage par enlèvement de matière.

II.3.2 Perçage par jet d'eau

Le perçage par jet d'eau est une technique d'usinage qui utilise un jet d'eau haute pression et grande vitesse, généralement mélangé à des particules abrasives, pour enlever de la matière d'une pièce. La principale caractéristique, par rapport aux autres procédés de découpe, est qu'il assure une découpe à froid, sans endommagement ni déformations thermiques du matériau. Le matériau est découpé par dépassement de sa limite élastique [25].

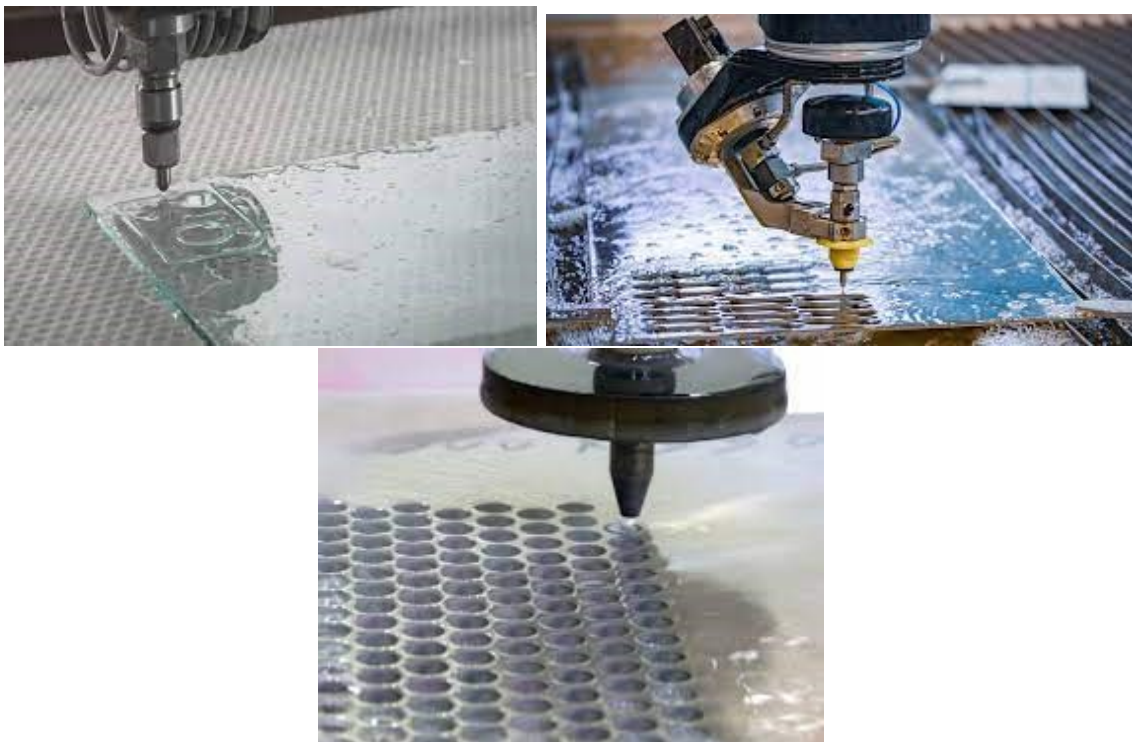


FIGURE II.2 – Perçage par jet d'eau.

★Avantages

- ★ La capacité de découper des matériaux variés, qu'ils soient souples ou extrêmement durs ;
- ★ Augmentation de la vitesse de coupe ;
- ★ Une mise en œuvre aisée, en contraste avec les exigences complexes liées à l'utilisation du laser ;
- ★ Aucun rapport thermique donc pas de chaleur, ni échauffement ;
- ★ La réalisation de coupes nettes et précises, comparable à celles obtenues avec la technologie laser ;
- ★ Absence de poussière ;
- ★ Pas besoin de changer d'outil pour découper différents types de composites, ni de trou de départ, et une faible émission sonore pour un confort accru.

★Inconvénients

- ★ Perpendiculairement à son axe, le jet à une stabilité assez faible, déviation à l'intérieur du sillon de coupe ;
- ★ Front de coupe courbé selon une direction opposée à la direction d'avance ;
- ★ Moins rapide que le laser ou le plasma (environ dix fois moins rapide) car il nécessite des vitesses d'avance inférieures ;
- ★ Moins précis que le laser ou le plasma ;
- ★ Coût d'exploitation élevé par une faible durée de vie de certains composants (usure des buses) ;
- ★ Dans le cas d'une avance très rapide, le jet n'érode que les parties douces et saute les fibres ;
- ★ Arrachement côté sortie, dû au fait que la capacité d'usinage du jet a été absorbée par les couches supérieures ;
- ★ Effet néfaste de l'eau.

II.3.3 perçage au laser

Le principe du laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, c'est-à-dire Amplification de la lumière par émission stimulée de radiation) repose sur la création d'une décharge électrique de plusieurs millions de volts entre deux électrodes dans un mélange gazeux, tel que le dioxyde de carbone (CO₂), maintenu à une pression de plusieurs millibars.

Ce procédé permet de découper des matériaux avec une grande précision en utilisant un faisceau laser puissant, focalisé sur une petite zone de la surface du matériau. Le rayon laser élève la température du matériau jusqu'à la fusion ou la vaporisation. Étant donné que la zone thermiquement affectée par le laser est très réduite, généralement autour de 0,5 mm, les déformations des parties découpées sont minimales. Le processus de découpe est généralement contrôlé par un ordinateur qui guide le laser et détermine le trajet de découpe.

En général, plusieurs types de lasers sont utilisés, notamment les lasers à gaz carbonique (CO₂), les lasers YAG dopés au néodyme (grenat d'aluminium et d'yttrium), et les lasers à fibre. Les caractéristiques essentielles du laser comprennent le mode de fonctionnement, la puissance, la stabilité et la polarisation. Les variables les plus importantes comprennent la lentille de focalisation, la position focale, la vitesse de découpe et l'utilisation d'un gaz d'assistance. Une installation laser complète comprend la source laser, la structure de support, le système de déplacement du faisceau, l'armoire de contrôle, le dispositif d'aspiration des fumées et les écrans de protection.

En ce qui concerne les risques associés à l'utilisation du laser, la norme NFC 43-801 établit une classification des lasers en cinq catégories correspondant à différents niveaux de risque. Les lasers utilisés pour la découpe sont généralement classés dans la catégorie 4. Il est recommandé de travailler dans une cabine fermée en identifiant les zones susceptibles d'être exposées au rayonnement laser [25] .



FIGURE II.3 – Perçage au laser.

☆ Avantages

- ✱ Un niveau élevé de précision, atteignant 0,1 mm pour les lasers CO₂ et allant jusqu'au micron pour les lasers YAG ;
- ✱ Une vitesse de coupe très élevée dans divers matériaux ;
- ✱ La capacité à découper des formes extrêmement complexes grâce à des machines à 5 axes ;
- ✱ Une déformation minimale du matériau ;
- ✱ La possibilité, de manière non exhaustive, de réaliser des opérations telles que la soudure, la gravure, le traitement de surface et le brasage sur la même machine, permettant ainsi de regrouper plusieurs étapes de fabrication sur un seul équipement ;

- ✱ L'absence d'usure de l'outil de découpe.

☆ Inconvénients

- ✱ Coût élevé de l'installation ;
- ✱ Limitation en épaisseur de la pièce à découper ;
- ✱ Formation d'une zone affectée par la chaleur ;
- ✱ Nécessité de décontaminer les gaz d'assistance.

II.4 Problématique de perçage des matériaux composites

L'opération de perçage des pièces fabriquées à partir de matériaux composites est intrinsèquement complexe, requérant un niveau élevé de compétence et l'utilisation d'outils spécialement conçus pour ces matériaux. L'objectif principal du perçage est d'obtenir des trous présentant une qualité de surface optimale. Cependant, ce processus peut compromettre la résistance mécanique du matériau, entraînant ainsi des dommages dans la zone environnante, tels que l'arrachement des fibres ou la dé-lamination, aussi bien à la surface qu'à l'intérieur du matériau.

Bien que les méthodes de perçage au laser et par jet d'eau aient montré des résultats satisfaisants, l'utilisation de forets demeure prédominante dans l'industrie. Ces forets doivent résister efficacement à l'abrasion et au frottement aux interfaces entre le copeau et la surface de coupe, ainsi qu'entre la face de dépouille et la surface usinée. Il est essentiel que ces outils maintiennent leur performance à des températures élevées, minimisant ainsi tout risque de dégradation thermique de la matrice du matériau. De plus, la résistance à l'usure par abrasion de l'arête de coupe est cruciale, car la perte d'efficacité peut entraîner d'importants dommages dans la pièce, notamment l'arrachement et la dé-lamination.

II.4.1 Les conditions de perçage

Les conditions de perçage des matériaux composites incluent plusieurs paramètres et facteurs importants à prendre en compte pour assurer un processus de perçage efficace et de haute qualité. Voici les principales conditions à considérer :

- ✧ **Vitesse d'avance** : La vitesse à laquelle l'outil est avancé dans le matériau affecte la qualité du perçage et la durée de vie de l'outil ;
- ✧ **Vitesse de rotation de l'outil** : La vitesse à laquelle l'outil coupant tourne est essentielle pour obtenir un trou de la bonne taille et éviter la surchauffe ;
- ✧ **Profondeur de perçage** : La profondeur à laquelle vous percez le matériau doit être contrôlée avec précision pour répondre aux spécifications de l'application ;

- ✧ **Lubrification et refroidissement** : Certains matériaux composites nécessitent une lubrification ou un refroidissement pour éviter la surchauffe de l'outil et la dégradation du matériau ;
- ✧ **Choix de l'outil** : Le type d'outil coupant que vous utilisez, tel qu'un foret ou une fraise, doit être adapté au matériau composite spécifique que vous percez ;
- ✧ **Type de matériau composite** : Différents matériaux composites ont des caractéristiques différentes, ce qui peut influencer les conditions de perçage. Certains sont plus résistants que d'autres ;
- ✧ **Géométrie de l'outil** : La forme et la géométrie de l'outil, y compris l'angle de coupe, jouent un rôle crucial dans le résultat du perçage ;
- ✧ **Temps de cycle** : Le temps disponible pour réaliser le perçage peut influencer les paramètres de perçage, notamment la vitesse d'avance ;
- ✧ **Contrôle de la qualité** : Des techniques de mesure et de contrôle de la qualité peuvent être nécessaires pour vérifier les dimensions et la qualité du trou percé ;
- ✧ **Évacuation des copeaux** : Il est important de s'assurer que les copeaux générés lors du perçage sont correctement évacués pour éviter l'accumulation et les dommages à la pièce.

II.4.2 Géométrie de l'outil

Un outil coupant est constitué d'un corps d'outil comportant une ou plusieurs parties actives. La partie active est constituée d'une arête de coupe, intersection de la face de coupe (A_γ) et de la face de dépouille (A_α) [26] .

* Définition des faces de l'outil

- A_γ : face de coupe (γ : "gamma") → Face sur laquelle glisse le copeau.
- A_α : face de dépouille (α : "alpha") → Face devant laquelle passe la surface qui vient d'être usinée.
- S : arête de coupe principale → Intersection entre A_γ et A_α .

Afin de savoir comment se comporte en usinage chaque partie (voir la figure II.4). Ce type de forêt est à la base des améliorations spécifiques qui sont apportées à la géométrie dans le cas de l'usinage des matériaux composites.

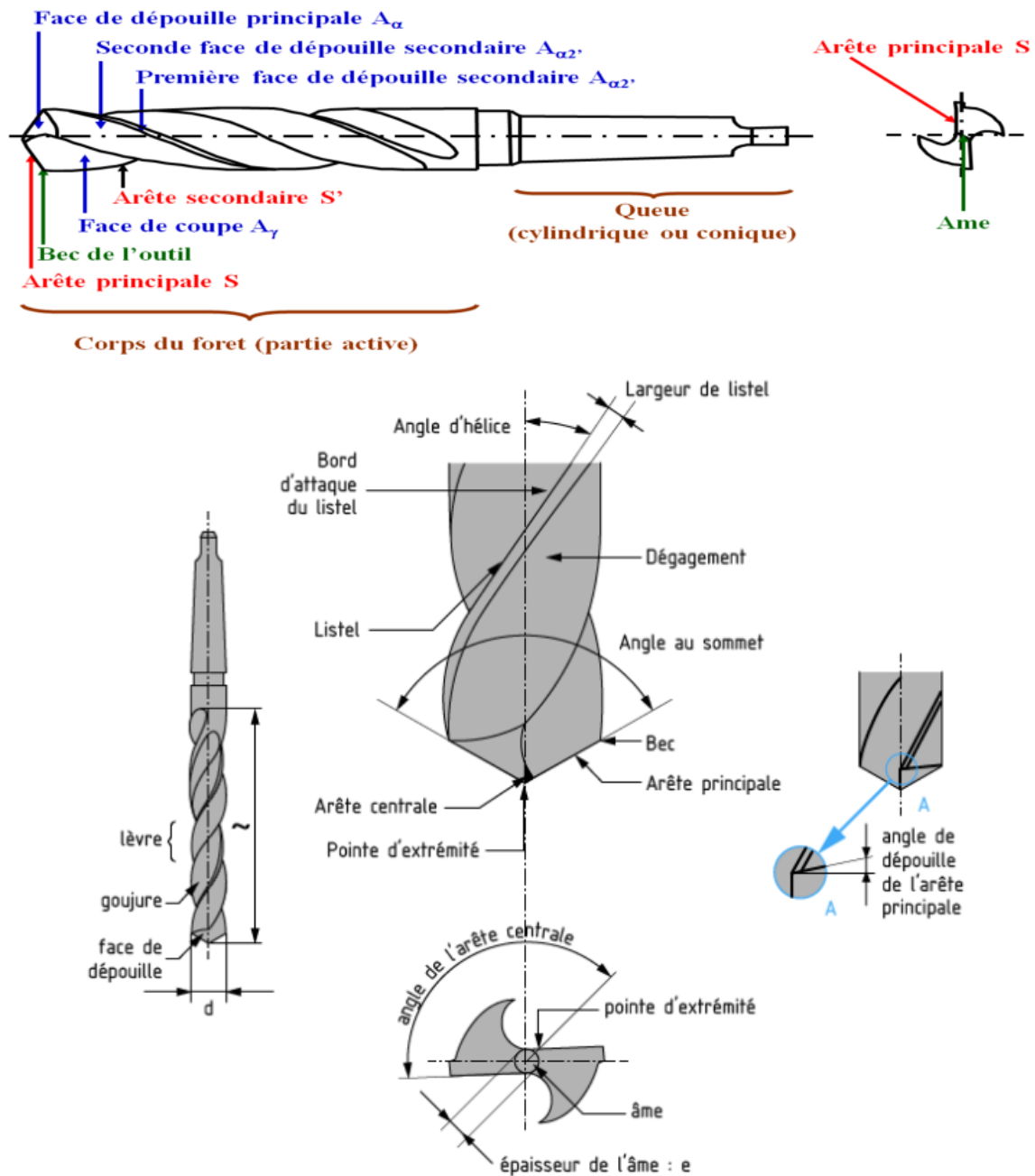


FIGURE II.4 – Géométrie d'un foret hélicoïdal ISO 3002/1-1982.

II.4.3 Matériaux d'outils

❖ Outils à aciers rapide

Les outils à acier rapide sont des outils de coupe fabriqués à partir d'un type d'acier spécial appelé "acier rapide" ou "acier rapide à haute vitesse" (HSS, pour High-Speed Steel en anglais). Ces outils sont largement utilisés dans l'usinage, la découpe et la fabrication de pièces dans diverses industries en raison de leurs excellentes propriétés de coupe à haute vitesse.



FIGURE II.5 – Outils à acier rapide.

❖ Outils à carbures de tungstène (WC)

Ces matériaux sont issus de la métallurgie des poudres. Les grains de carbure de tungstène permettent d'obtenir une dureté à chaud et une résistance à l'abrasion nettement supérieures aux aciers rapides. Les états de surface obtenus sont plutôt satisfaisants.

Pour améliorer encore leurs performances, ils peuvent être revêtus de dépôts ioniques obtenus essentiellement par procédés :

- * PVD (Physical Vapor Deposition) ;
- * CVD (Chemical Vapor Deposition).

Une grande variété de revêtements est déposable (TiN, TiCN, TiAlN, Al₂O₃, etc.) avec un bon accrochage sur le substrat.



FIGURE II.6 – Outils à carbure de tungtène.

❖ Outils à nitrure de bore cubique (CBN)

Le nitrure de bore cubique obtenu par frittage à haute pression et haute température est le constituant le plus dur utilisé en usinage après le diamant. Il présente une structure réticulaire et une dureté similaire à celle du diamant. Il est plus résistant à l'usure que le carbure de tungstène. Il conserve sa dureté à 1000°C et permet non seulement de travailler à des vitesses de coupe très élevées mais surtout d'usiner des matériaux de dureté supérieure à 55 HRc.



FIGURE II.7 – Outils à nitrure de bore cubique.

❖ Outils à diamant

Le diamant naturel et le diamant poly cristallin (PCD) obtenu par la métallurgie des hautes pressions et températures comme le NBC constituent une substance particulièrement dure (HRC 100), la plus résistante à l'abrasion, Il permet des vitesses de coupe très élevées sans usure appréciable, un excellent état de surface et précision dimensionnelle.



FIGURE II.8 – Outils à diamant.

Actuellement, il existe plusieurs catégories d'outils employés pour le perçage de matériaux composites (comme illustré dans la figure II.9). Parmi ces diverses catégories, on peut identifier les forets suivants :

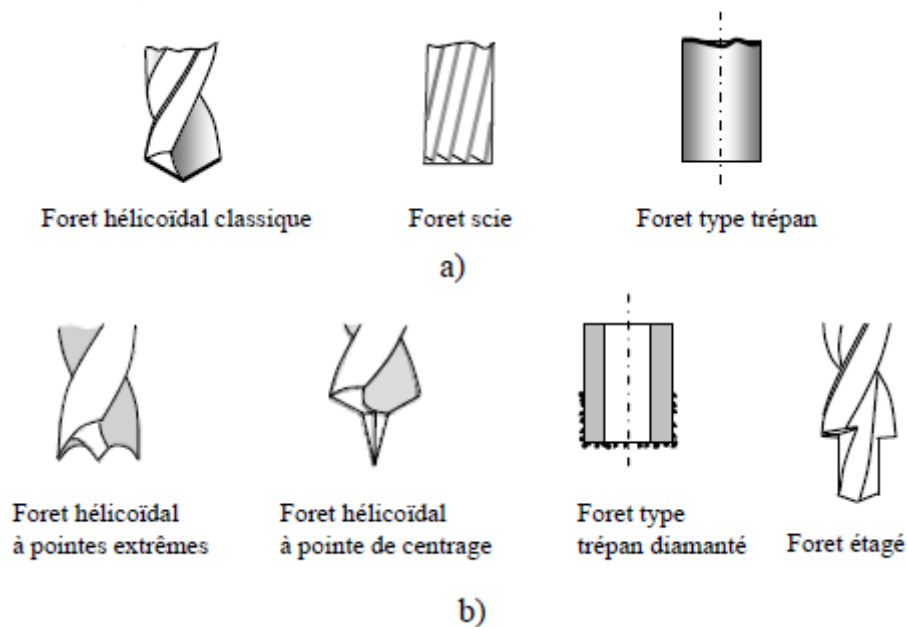


FIGURE II.9 – Autre types de forêts.

Pour résumer, la majorité des travaux sur l'usinage des composites à matrice polymère avec renforcement fibreux en carbone recommandent l'emploi d'outils soit en WC soit en PCD. Le choix des outils PCD est souvent privilégié pour leur bien meilleure résistance à l'usure [27] .

II.5 Les conditions de coupe optimales choisie pour perçage des matériaux composites

La recherche des conditions optimales pour le perçage des matériaux composites a pour objectif de minimiser la rugosité de surface et les efforts de coupe tout en conservant une durée de vie de l'outil économiquement viable.

Les paramètres de perçage pour les outils PCD sont indiqués dans le tableau II.1 :

TABLE II.1 – Conditions de perçage pour les outils PCD et revêtements diamant A2C.

Matériau	Type de revêtement 2AC	Vitesse de coupe (m/min)	Avance par dent (mm)
Carbone	C16H	45 à 150	0.04
Carbone	PCD D1	250 à 350	0.04
Composite + Titane	PCD D3	40	0.05
	ou C16H	ou 12	0.03
CFRP /Aluminium	C16H	45	0.03
	C16H ou PCD	200 à 300	0.05
Carbone T700	C16H ou PCD	300	0.05
Composite + Fibres de verre	C16H	200 à 300	0.05
	B15H PCD D3	70	0.03
CFRP CFRP/Aluminium CFRP/Titane Aluminium Titane Inox CFRP	C16H	100	0.08
	C16H	60	0.08
	C16H	60 à 20	0.05
	C16H	60	0.08
	C16H	15 à 20	0.05
	C16H	15 à 20	0.05
	C16H ou PCD D1	200 à 500	0.08

Une forêt en acier rapide peut convenir, mais la qualité est améliorée avec un forêt au carbure. Il est recommandé de maintenir l'arrière de la pièce et de ralentir l'avance avant de déboucher, afin d'éviter un délaminage des dernières couches. Pour le perçage des stratifiés tissés, la qualité de coupe et, notamment, l'absence de délaminage, est améliorée si le forêt comporte une pointe centrale de guidage et un bord de coupe réduit pour diminuer le frottement sur le bord du trou [28].

Les paramètres de perçage pour des forêts hélicoïdales sont représentés dans le tableau II.2 .

TABLE II.2 – Paramètres de perçage des stratifiés pour les forêts hélicoïdales.

Paramètre	Unité	Verre-Résine	Carbone-Résine		Cellulosique
			Foret carbure	Trépan diamanté	
Angle de coupe	degré	8 à 10			4 à 8
Angle d'hélice	degré	25			10
Angle de pointe	degré	120	118		70 à 120
Avance	mm/tr	≤ 0.2	0.03	0.01 à 0.05	0.2 à 0.5
Vitesse de coupe	m/min	60 à 70	15 à 20	50 à 70	30 à 80

Pour obtenir une bonne qualité de surface percé et plus peuvent apporter moins. L'endommagement au voisinage de la zone usinée dans les matériaux composites, Les constructeurs ou chercheurs doivent connaitre plusieurs facteurs fondamentaux importants qui sont :

- ◆ Examiner les caractéristiques des composantes des matériaux composites (fibre et matrice), et l'orientation des fibres, stratification des couches, etc ;
- ◆ Choix d'outil de perçage suivant le type du matériau et de la géométrie d'outil approprié (angle d'hélice, angle de coupe, etc.) ;
- ◆ Choisir les bonnes conditions de perçage pour les matériaux usinés (l'avance, la vitesse de coupe, etc.) ;
- ◆ Enfin, vous devez savoir si le processus de perçage doit être le refroidissement ou non, pour éviter la dégradation thermique de la résine et l'usure de l'outil de perçage.

II.6 Endommagement du composite

Tous les travaux qui viennent d'être cités se cantonnent à une approche technologique et macroscopique des comportements des outils dans l'étude de la coupe des composites à matrice polymère. Pourtant, la compréhension des phénomènes mis en jeu au niveau de l'arête de coupe nécessite des études aux échelles microscopiques, à ces niveaux d'observation, l'hétérogénéité des matériaux composites ne peut être négligée.

Les matrices thermodurcissables en général et la matrice époxyde en particulier ont un mode de rupture fragile. Les fibres de carbone possèdent également cette propriété.

Il apparaît que les conditions générales d'usinage des matériaux métalliques peuvent être appliquées aux matériaux composites à matrice thermodurcissable.

Dans l'analyse de l'usinage des matériaux composites, on s'intéresse en premier temps au comportement des composants et après aux paramètres liés à l'architecture du composite comme par exemple l'empilement des différentes couches.

II.6.1 Formation du copeau

Furent les premiers à s'intéresser aux mécanismes de formation du copeau dans les composites. En effet, les auteurs ont effectué des essais de coupe brusquement interrompue sur des composites carbone/époxy et ce pour des orientations des fibres de 0° et 90° . Pour réaliser ces essais, une nouvelle technique de préparation des copeaux a été adoptée. Celle-ci consiste à appliquer une colle adhésive à base de caoutchouc sur la surface de la pièce avant usinage. La matière ensuite découpée par les arêtes de coupe de l'outil reste ainsi sous forme de "macro-copeaux". Cette procédure permet d'éviter la forme poudreuse des copeaux rencontrée habituellement en usinage des composites.

Cette première tentative de compréhension des mécanismes de la coupe par enlèvement de matière dans les composites fut prolongée par plusieurs travaux, et notamment par Wang et al [30], toujours en coupe orthogonale. L'ensemble de ces auteurs disent que l'orientation des fibres est le facteur d'influence principal sur la formation du "copeau". Ils sont d'accord également, mais à des degrés d'influence différents, sur la nature du composite (matrice et fibres) ainsi que l'angle de coupe de l'outil comme deux paramètres majeurs. Leurs conclusions pratiquement communes permettent de différencier plusieurs modes d'enlèvement de matière suivant l'orientation des fibres.

Pour une orientation des fibres à 0° , les mécanismes de formation de copeau se déclinent d'abord par un chargement en mode I (par ouverture) de la section coupée avec rupture le long de l'interface fibre/matrice combiné à un chargement en mode II (glissement droit) dans la direction d'avance de l'outil. La séparation du "copeau" se produit ensuite après rupture des fibres dans une direction perpendiculaire à leur axe. Lors de la coupe d'une couche à 0° , l'outil décolle les fibres et les arrache comme un copeau de bois. Si on arrive entre 2 couches (à cause du réglage ou de l'usure), l'état de surface risque d'être de moins bonne qualité. L'usinage des fibres à 0° produit de grands débris fragmentés.

Pour des orientations positives des fibres jusqu'à $+75^\circ$, le mécanisme de formation du copeau consiste en un cisaillement des fibres par l'arête de coupe. Le copeau est ensuite formé par cisaillement des interfaces fibres/matrice jusqu'à la surface libre. Lors de la coupe des fibres orientées à 45° , l'outil arrive à couper la couche directement. L'existence d'irrégularité est due au matériau, au lieu de le couper, l'outil le casse, pas toujours de façon nette. Les fibres à 45° donnent de tout petits débris.

Pour une orientation des fibres à 90° ainsi que pour les orientations négatives, l'enlèvement de matière est initié par une ouverture en mode I qui pénètre dans la matière (en dessous de la direction de coupe) en suivant l'interface fibre/matrice, prolongée par une rupture secondaire qui remonte jusqu'à la surface en suivant le cisaillement des fibres. Dans le cas de l'usinage des fibres orientées à 90° , les défauts sont représentés par le décollement des fibres. Les auteurs ont observé que les fibres sont penchées en avant par paquets. C'est lors de la coupe des fibres orientées à -45° , que les fibres fléchissent le plus et finissent par être arrachées. On remarque des défauts importants qui se propagent vers l'intérieur en ce qui concerne les fibres à -45° . De plus les auteurs ont remarqué aussi un décollement des fibres et de la matrice [32]. Koplev souligne que dans le cas d'une orientation des fibres à 0° , la propagation brutale des fissures le long des fibres en condition de déformation de flexion provoque l'apparition des fissures en surface dont la taille maximale n'excède pas deux fois le diamètre des fibres. Lorsque les fibres sont orientées à 90° , la zone de compression située en dessous de l'outil entraîne des fissures de longueur 0,1 à 0,3 mm en profondeur dans le composite [29].

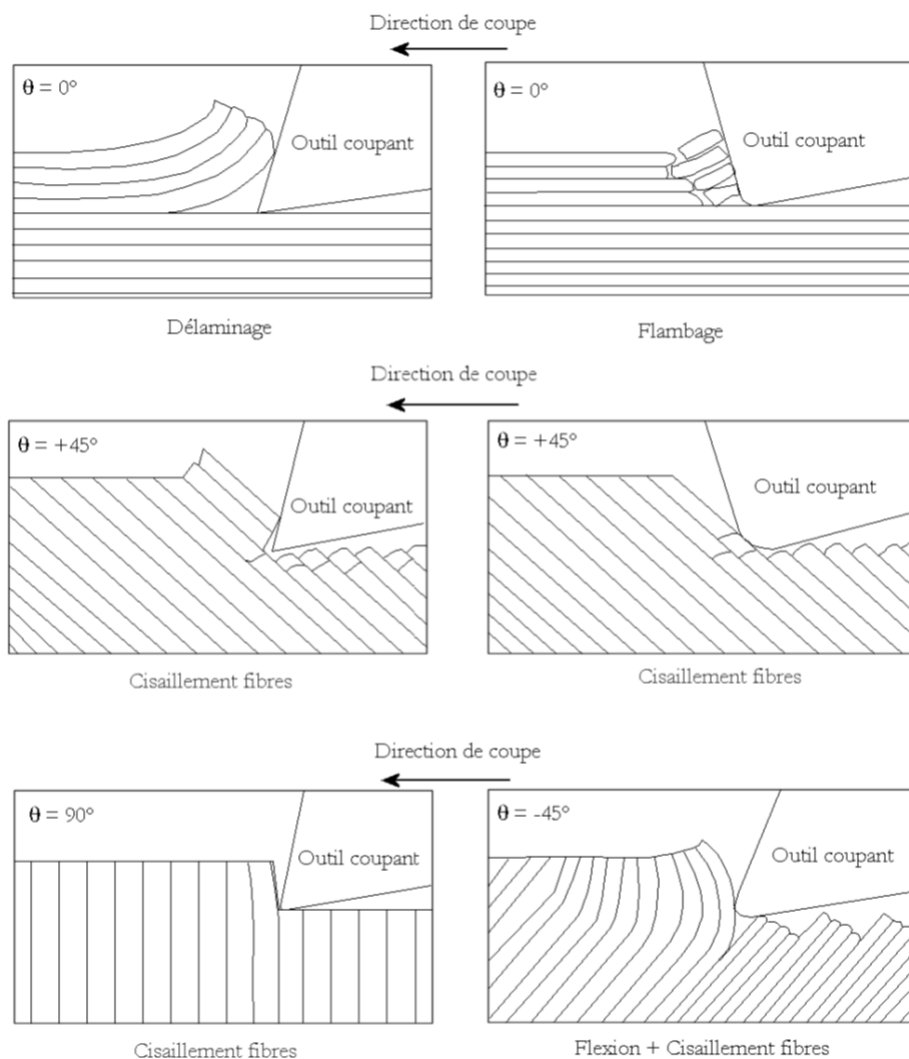


FIGURE II.10 – Mécanismes de formation du copeau en coupe orthogonale du composite carbone/époxy unidirectionnel.

Un modèle de simulation par éléments finis proposé par Arola et Ramulu, reprend les observations expérimentales de la formation du copeau en coupe Orthogonale dans un composite.

Ce modèle prévoit la formation du copeau en deux zones successives de rupture fragile par cisaillement. Les orientations et les géométries de ces deux zones (cisaillement primaire et cisaillement secondaire) sont fonction des orientations des fibres par rapport à la direction de coupe. Les descriptions de formation de copeaux sont assez simplistes et reposent sur des observations de "macro-copeaux" et non directement sur des copeaux. Ces descriptions apportent des éléments intéressants de compréhension des mécanismes de coupe.

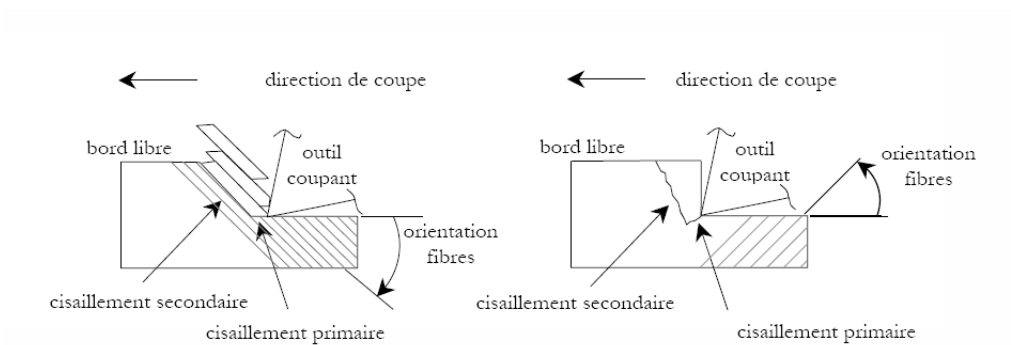


FIGURE II.11 – Mécanismes de formation du copeau en coupe orthogonale du composite carbone/époxy Unidirectionnel

II.6.2 Endommagements produits par la coupe des composites

Le perçage des composites à matrice thermodurcissable peut provoquer plusieurs types de défauts. De nombreuses observations ont fait apparaître ces défauts. Les sollicitations mécaniques et thermiques que subit le matériau composite, lors des opérations d'usinage, génèrent des endommagements. Ce paragraphe présente les dommages caractéristiques relevés fréquemment dans la littérature [30].

Peluchage : Caractérisé par une mauvaise découpe des fibres par l'outil. Les fibres coupées ont un aspect effiloché, avec un floconnage de la surface lors des opérations de perçage ou de fraisage. Il est essentiellement présent lors de la coupe des composites à fibres d'aramide.

Dé cohésion des fibres : Se caractérise par des décollements de la matrice de morceaux entiers de fibres non rompues. Le fléchissement des fibres sous la poussée de l'arête de coupe au niveau de la surface usinée conduit à un déplacement relatif des fibres par rapport à la matrice assimilable à un glissement qui entraîne une décohésion de l'interface fibre/matrice.

Arrachement : Se produit selon l'orientation relative des fibres par rapport à l'arête de coupe (-15° à -75°), avant que les fibres ne soient rompues par cisaillement. Les fibres sont soumises à des sollicitations qui peuvent provoquer l'arrachement des

morceaux de fibres et de matrice, laissant ainsi des cavités sur la paroi du trou. Ce phénomène est davantage présent dans le cas des stratifiés fortement orientés.

Dégradation thermique : Un dégagement excessif de chaleur au cours d'usinage peut entraîner un risque de dégradation thermique. Globalement, ce risque provoque la carbonisation des matrices thermodurcissables et la "fusion" des matrices thermoplastiques. Ce dommage se manifeste systématiquement sous forme binaire Présence ou non de dégradation thermique.

Le délaminage : le mécanisme de délaminage est caractérisé par la séparation des plis dans l'épaisseur du composite. Il se distingue par la formation de fissures inter-laminaires dans la matière. Cet endommagement se manifeste en perçage, particulièrement en entrée de trou (soulèvement des plis en périphérie du foret dû essentiellement à l'angle de coupe et à l'angle d'hélice du foret) et/ou en sortie de trou (poussée des plis due à l'âme du foret). A l'entrée du foret dans le composite le mouvement de rotation conjugué à l'inclinaison de l'hélice a tendance à entraîner le matériau vers le haut. Ces actions combinées introduisent une force de pelage verticale séparant les couches supérieures du restant de la plaque. Le paramètre qui définit l'apparition du délaminage à la sortie du foret est l'intensité de l'effort de pénétration. En conséquence tous les paramètres qui influencent l'effort d'avance vont implicitement influencer le délaminage. La vitesse de coupe est nulle au centre de l'outil (pointe) et pas très élevé au niveau de l'âme. La matière située devant l'âme du foret subit un effort axial, qui par déformation est poussée avant d'être cisailée par les arêtes de coupe principales. Le délaminage est moins fréquent en fraisage (décollement des plis dû à l'angle d'hélice de la fraise). En fraisage, le délaminage peut prendre la forme de déchaussement complet des fibres, particulièrement au début et à la fin des prises de passe de contournage lorsque la fraise entre ou sort de la pièce. En rabotage (coupe orthogonale) le délaminage peut être représenté en fonction de l'orientation des fibres par des morceaux de fibres qui sont poussées et ne sont pas coupées, ou écaillées à la fin de l'usinage. Particulièrement rencontré en perçage aux abords des surfaces libres du composite, le délaminage accompagné de déchirure complète de morceaux de plis est dénommé écaillage.

Les paramètres susceptibles d'influer sur l'effort d'avance sont les suivants : vitesse d'avance (avance par tour), forme de l'âme, angle d'hélice et de pointe, l'acuité d'arête de coupe. Une baisse de vitesse d'avance fait chuter l'effort de pénétration donc diminue le délaminage. L'âme du foret est la partie qui relie les deux arêtes de coupe. Il est possible de modifier la géométrie de l'âme du foret pour faire évoluer son comportement en usinage. L'amincissement de l'âme peut provoquer une chute de l'effort de pénétration (jusqu'à 30%) et donc une diminution du délaminage. Guegan indique que l'augmentation de l'angle d'hélice, ainsi que la diminution de l'angle de pointe permet de diminuer la composante axiale des efforts de coupe. Expérimentalement l'effort de pénétration le

plus faible a été observé avec les forets dont l'angle d'hélice est de 45° et l'angle de pointe de 70° . Pour obtenir l'effort d'avance mesuré pendant le perçage à la composante axiale de la somme des efforts générés le long des deux arêtes de coupe on rajoute l'effort de compression généré par l'âme du foret.

Dans une étude du perçage d'un composite verre/époxy, Tagliaferri et al soulignent l'absence de norme pour évaluer les endommagements inhérents à la coupe. Les auteurs ont quantifié les endommagements d'écaillage par la largeur endommagée marquée par un liquide pénétrant. Ils ont déterminé que le rapport vitesse de coupe sur vitesse d'avance (V_c/V_f) est un critère très influent. Leurs constatations montrent que pour un rapport V_c/V_f inférieur à 100, le perçage par foret en acier rapide de diamètre 8 mm génère des copeaux épais et irréguliers, et pour un rapport V_c/V_f supérieur à 250 donne des copeaux sous forme de poussière (ou de poudre). Pour les très grandes valeurs du rapport V_c/V_f , les dommages thermiques des fibres et de la résine restent limités à un petit volume autour du trou. Ces travaux ont été prolongés par Di Ilio et al pour des opérations de perçage d'un composite unidirectionnel thermoplastique renforcé de fibres de carbone. Ils constatent que les endommagements sont influencés par l'orientation des fibres (endommagements faibles lorsque les fibres sont orientées de 0° à 45°). Pour diminuer les endommagements sur toute la périphérie du trou Tagliaferri et al trouvent une limite de l'avance par tour, qui est le rapport de la vitesse d'avance sur la vitesse de rotation (fonction de la vitesse de coupe et du diamètre de l'outil), de 0,3 mm/tr. La morphologie des bords de perçage est inégale, suivant l'orientation des fibres. L'intérieur du trou est en général lisse, sauf pour les grandes avances.

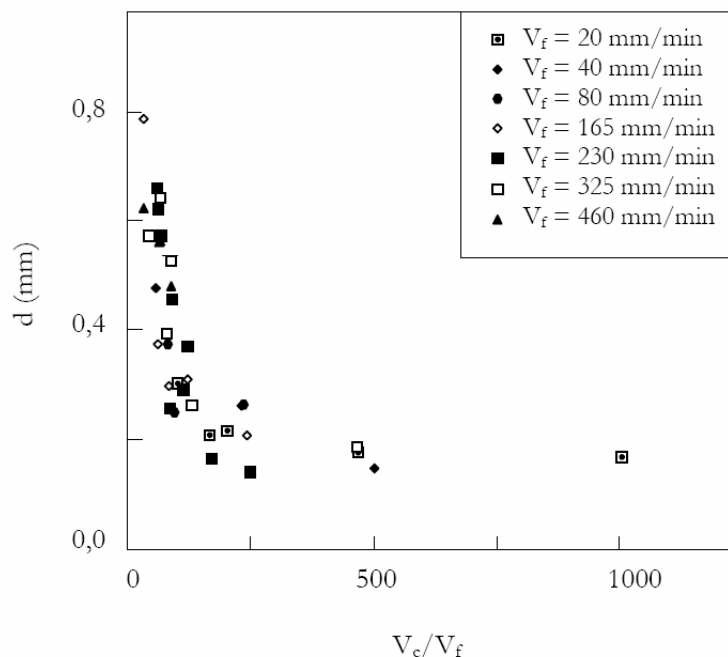


FIGURE II.12 – Taille de la zone endommagée d en fonction du rapport vitesse de coupe (de 1,5 à 40 m/min) sur vitesse d'avance de 20 à 460 mm/min.

Afin de minimiser l'usure d'outil et de limiter les endommagements inhérents à la coupe, Person et al ont étudié l'influence de trois types d'outils lors du perçage d'un composite carbone/époxy $[(\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ) 3] 24S$. Les outils testés étaient une fraise diamantée en perçage orbital (perçage par interpolation circulaire avec une fraise de diamètre inférieur au diamètre du trou percé), un foret PCD et un foret en WC en perçage classique. La comparaison des endommagements occasionnés dans les trois configurations montre que le composite percé avec une interpolation hélicoïdale (perçage orbital) est le seul exemple où on trouve des dommages importants. Dans son travail de thèse, en fraisage de composites à matrice époxy renforcés de fibres longues de verre ou de carbone, Guegan propose que, pour éviter les déchaussements de fibres en entrée et sortie de pièce, l'action de l'arête de coupe soit dirigée vers l'intérieur du matériau composite. De plus, ces décohésions, ainsi que celles sur les bords libres des pièces, sont plus faibles quand l'avance par dent est faible. Par contre, il détermine une avance limite de 0,01 mm/tr en dessous de laquelle apparaissent des endommagements thermiques.

II.7 Mécanismes d'endommagement dans les composites

De manière générale, l'endommagement est défini comme un ensemble de changements micro-structuraux au sein du matériau qui occasionnent une détérioration irréversible plus ou moins importante. Par exemple, quand une structure stratifiée est sollicitée, la dégradation de ses propriétés est effective bien avant sa rupture finale. En outre pour les matériaux composites, notamment ceux à forte anisotropie, sa géométrie dépend, non pas du mode de chargement comme pour les matériaux métalliques, mais de l'arrangement géométrique des constituants du composite. Notons également que l'endommagement présente un caractère unilatéral, les micro-fissures pouvant se refermer sous l'action du chargement [3, 10].

Il existe plusieurs types d'endommagement au sein d'une structure stratifiée de plis unidirectionnels ou tissés qui se révèlent différentes échelles d'observation. Les plus significatifs sont les suivants :

- * À l'échelle microscopique apparaissent les ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice : c'est le phénomène de décohésion fibre/matrice ;
- * À l'échelle microscopique, on observe l'apparition de nombreuses fissures intralaminaires mais également la rupture de fibres qui intervient au stade ultime de la ruine du matériau ;
- * À l'échelle macroscopique, on observe le phénomène de décollement interpli : c'est le délaminage. Pour les matrices renforcées de fibres de verre coupées, les phénomènes d'endommagement observés sont la décohésion fibre/matrice mais aussi la fissuration matricielle.

Pour les tissus, qui sont composés de torons entrecroisés, on peut noter deux classes principales de fissuration intra laminaire : les fissures transverses (identiques à celles des unidirectionnels) et les fissures longitudinales [5,12].

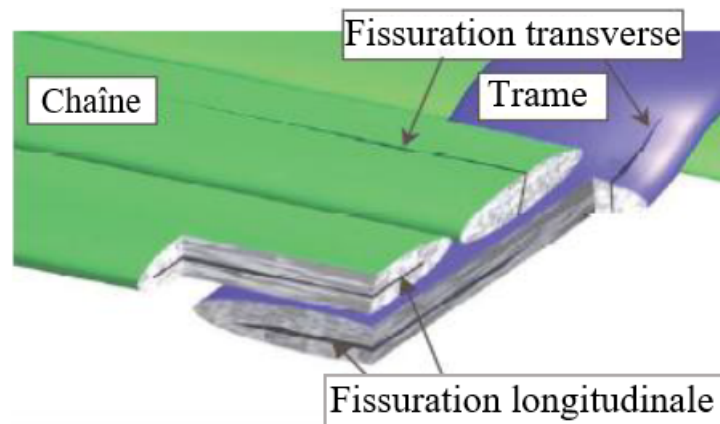


FIGURE II.13 – Types de fissuration intra laminaire dans un pli tissé.

Les fissures transverses apparaissent, de manière assez uniforme, parallèlement à l'axe des fibres et dans l'épaisseur des torons de trame et de chaîne (FigureII.13) [5].



FIGURE II.14 – Observation d'une fissure transverse sur la tranche d'une éprouvette de tissu (sens trame) .

II.8 Analyse de fissuration des matériaux composites

L'homogénéité et l'anisotropie des matériaux composites rendent leurs mécanismes d'endommagement plus nombreux et plus complexes. Au sein d'une structure composite, on peut voir apparaître l'endommagement constitué de micro dé-cohésion et de microfissures, ruptures de pli, ruptures des fibres et des matrices, dé-cohésion de l'interface, glissement et frottement des fibres dans la matrice. Les mécanismes d'endommagement sont nombreux et difficiles décrire, particulièrement la propagation des dé laminages et des ruptures de pli [25].

II.8.1 Rupture en fatigue

Les micro mécanismes d'endommagement sont les responsables de la rupture en fatigue sur des polyesters renforcés par des fibres continues et réparties aléatoirement. Il présente 3 stades d'endommagement [25-27] :

- a) Rupture d'interface ;
- b) Rupture de la matrice ;
- c) Coalescence des fissures entraînant la rupture brutale.

Dally et Carrillo ont travaillé sur des thermoplastiques renforcés à fibres courtes de verre de différentes longueurs. Les fibres plus courtes ont un meilleur comportement en fatigue que celui des fibres longues.

Ceci s'explique par les différents mécanismes d'endommagement conduisant la ruine du matériau. Dans le cas des fibres longues, les fissures sont concentrées dans les régions riches en fibres et se propageant, en suivant les interfaces tout autour des paquets de fibres existant. Ces fissures s'arrêtent et ne parviennent pas traverser les zones riches en matrice [2]. Dally et Carrillo ont travaillé sur des thermoplastiques renforcés à fibres courtes de verre de différentes longueurs. Les fibres plus courtes ont un meilleur comportement en fatigue que celui des fibres longues.

Ceci s'explique par les différents mécanismes d'endommagement conduisant la ruine du matériau. Dans le cas des fibres longues, les fissures sont concentrées dans les régions riches en fibres et se propageant, en suivant les interfaces tout autour des paquets de fibres existant. Ces fissures s'arrêtent et ne parviennent pas traverser les zones riches en matrice [25].

Les premières fissures s'amorcent et se propagent dans les paquets de fibres perpendiculaires à la direction de charge.

Pour les fibres courtes, les mécanismes sont différents. Les fibres sont réparties uniformément sans former de paquets ni de zones riches en matrice. De nombreuses microfissures se créent perpendiculairement à la charge ; celles-ci ne concernent qu'un petit nombre de fibres et sont aléatoirement réparties dans le volume.

Dally et Carillo ont mis en évidence que la rupture d'interface était encore le mécanisme de base, mais que la fissure ne se propageait pas dans la matrice. La ruine totale provient de la coalescence des microfissures.

D'autres études montrent l'importance des bouts de fibres dans la création des microfissures. Ces études suggèrent que dans les composites à fibres courtes, toutes les extrémités

de fibre sont des sites néfastes à la tenue en fatigue même lors de très faibles sollicitations.

La rupture finale d'un composite est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires [28,29] :

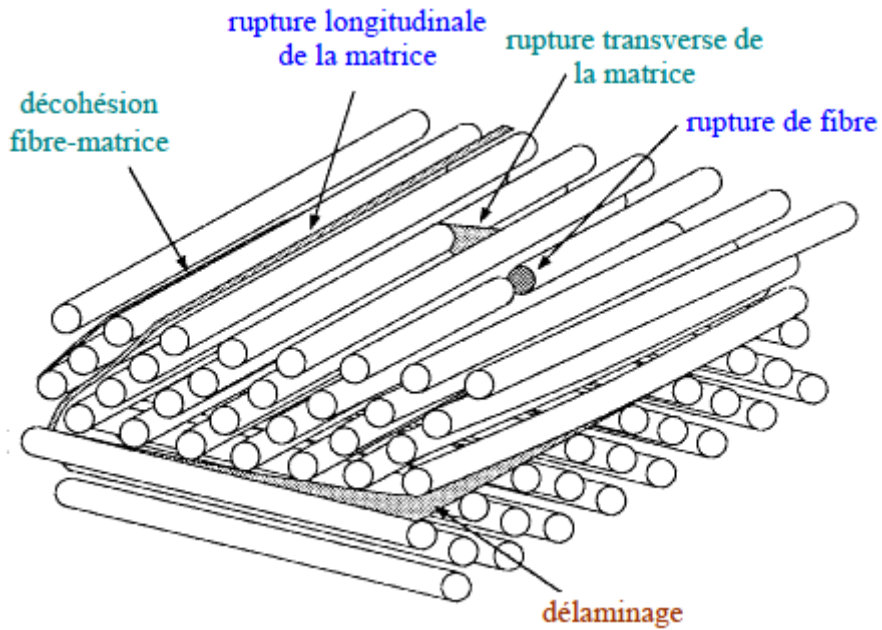


FIGURE II.15 – Mécanisme de rupture d'un stratifié.

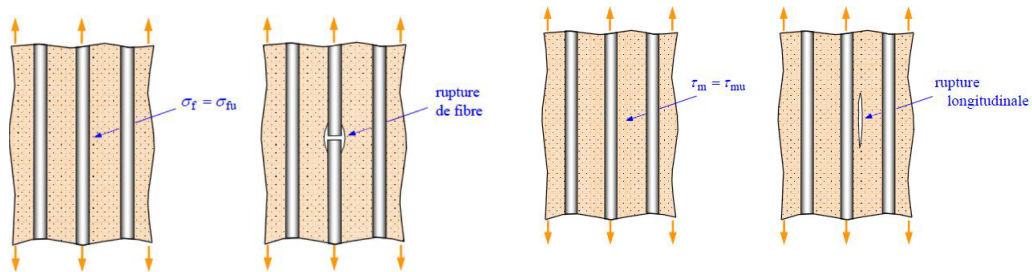


FIGURE II.16 – Rupture de fibres.

FIGURE II.17 – Rupture transverse de la matrice.

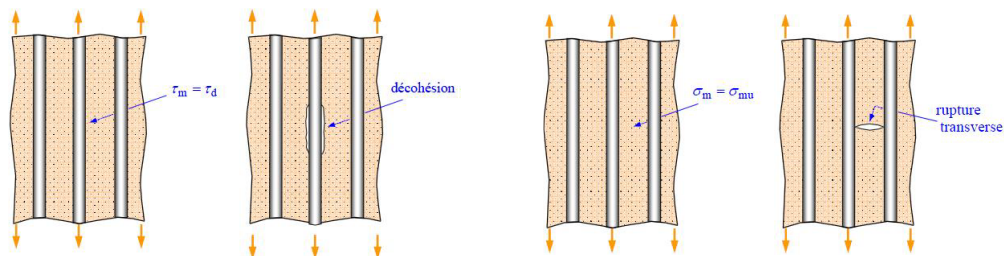


FIGURE II.18 – Rupture de l'interface fibre/matrice.

FIGURE II.19 – Rupture longitudinale de la matrice.



FIGURE II.20 – Rupture de l'interface entre les plis.

II.9 Caractérisation et quantification des défauts de perçage liés au perçage des stratifiés

II.9.1 Localisation des défauts

Pendant le processus de perçage du CFRP (matériau composite renforcé de fibres de carbone), diverses forces physiques sont appliquées au matériau, ce qui peut compromettre son intégrité. En conséquence, plusieurs catégories de défauts apparaissent, se localisant dans trois zones distinctes autour du trou [13].

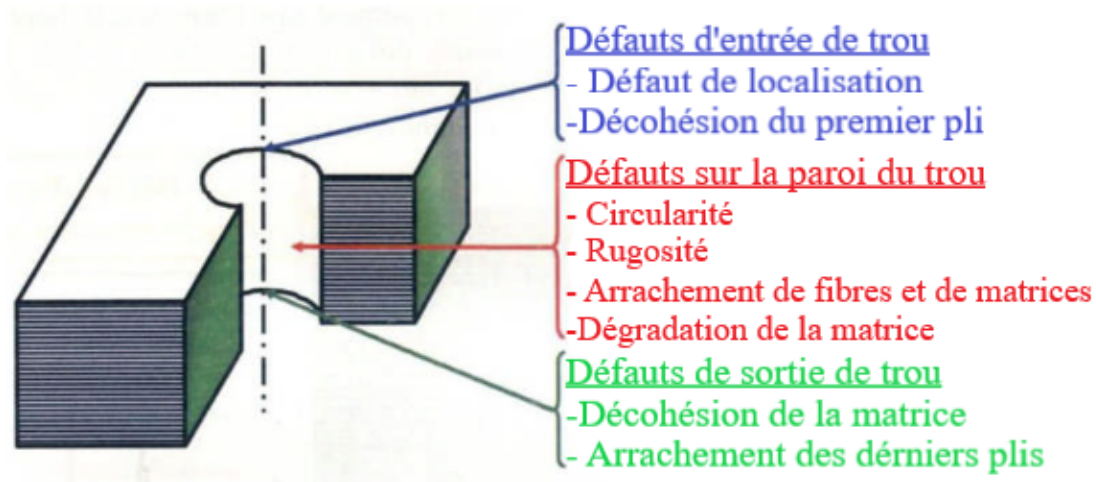


FIGURE II.21 – Défauts liés au perçage du CFRP.

⊗ Défauts situés en entrée du trou

Lorsque le foret pénètre dans le matériau composite, les bords tranchants ont tendance à soulever la première couche de la stratification. L'apparition de dé-laminations à l'entrée du trou est due à un effet de pelage provoqué par le bord tranchant principal du foret [14]. Cet effet de pelage est le plus prononcé lorsque le bec de l'outil atteint l'interface entre deux couches de matériau.

Ce pelage est responsable de la séparation de la première couche, tandis que la partie non coupée reste maintenue en place par la force de pénétration axiale, notée F_z . En d'autres termes, les défauts à l'entrée du trou sont déclenchés par l'effort axial et se propagent ensuite en raison de l'effort tangentiel. Utiliser un angle de coupe très faible peut prévenir ce type de défaut, mais cela peut fragiliser l'outil. Cependant, dans la plupart des cas, l'utilisation d'une contre-plaque à l'entrée du trou et d'un foret doté de bords tranchants bien affûtés est suffisante pour éviter les dé-laminations à l'entrée du trou [15, 13].

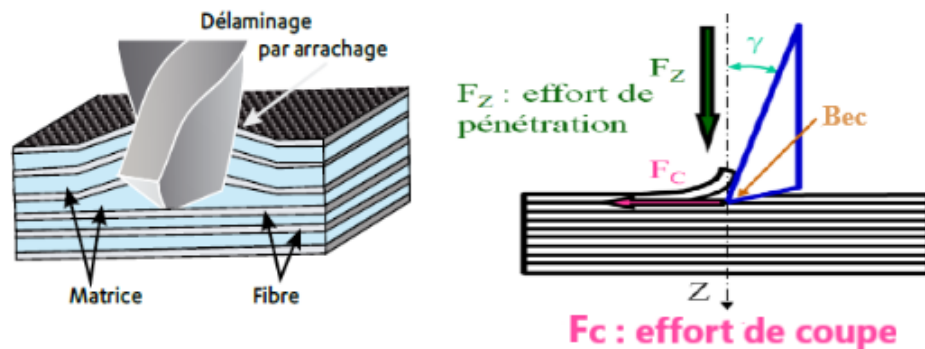


FIGURE II.22 – Mécanisme d'apparition des défauts à l'entrée du foret lors du perçage d'un composite stratifié .

Les approches utilisées pour repérer de tels défauts peuvent prendre diverses formes, y compris une évaluation visuelle (inspection à l'œil nu ou à l'aide d'une caméra). Cependant, cette méthode se révèle fiable uniquement pour repérer des dé-laminations significatives et ne permet pas une quantification précise du défaut. Une autre technique employée pour évaluer ce type de défaut consiste à effectuer une analyse par ultrasons. L'une des mesures couramment utilisées pour évaluer la taille du défaut est la détermination du diamètre maximal de la dé-lamination [16], comme illustré dans les Figures II.23 et II.24 .

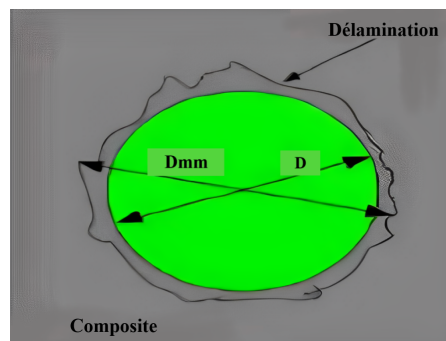


FIGURE II.23 – Définition de l'air de dé-lamination.

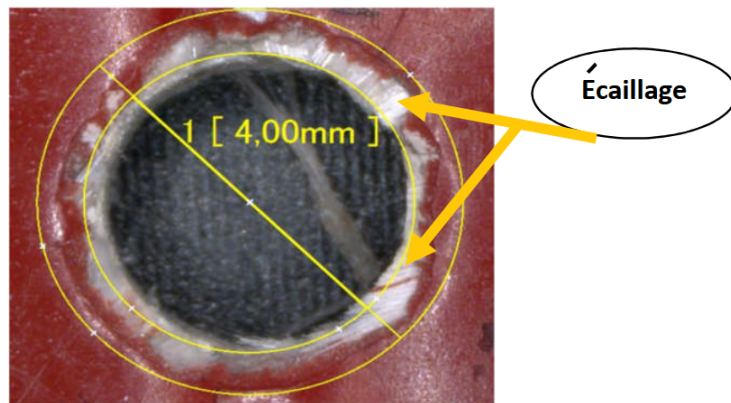


FIGURE II.24 – Défaut en entré du trou.

* Défauts situés sur la paroi du trou

Parmi les problèmes observés, on peut identifier des dé-laminations, des déchirures des fibres et de la matrice, des irrégularités dans la circularité des trous, ainsi que des altérations liées aux températures [17].

⊗ Défauts de circularité des trous :

En ce qui concerne les irrégularités de circularité des trous, ont noté que lors du perçage de couches unidirectionnelles en verre et en carbone (orientées à 0°), les trous présentent une forme ovale. Les défauts de circularité traduisent la précision de la forme à travers le paramètre dc ($dc = 1 \div 2 (d2 - d1)$). Les variations de cylindricité deviennent de plus en plus importantes en tant que critère de qualité, en raison de l'épaisseur de perçage souvent réduite des composites et de leur anisotropie.

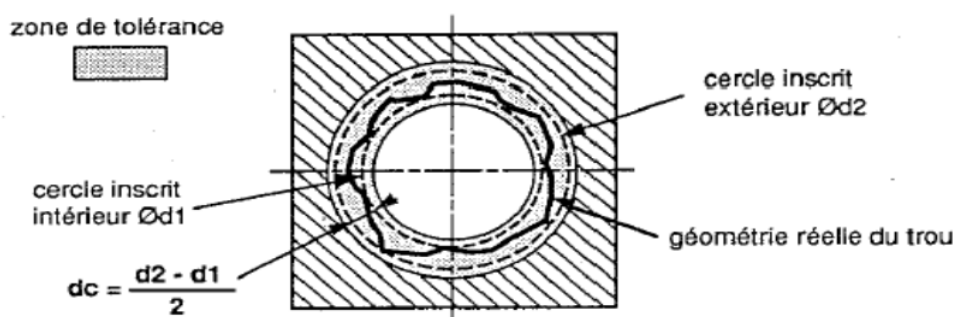


FIGURE II.25 – Critère de circularité.

En réalité, les imperfections de cylindricité peuvent engendrer des difficultés lors de la mise en place des fixations mécaniques. Ces anomalies découlent du fait que les bords tranchants exercent des contraintes variables sur les fibres en fonction de leur orientation par rapport au bord tranchant. Vous pouvez observer ce phénomène dans la FigureII.26, qui en donne une illustration [18].



FIGURE II.26 – Sollicitations des fibres selon leur angle par rapport à la vitesse de coupe.

Afin de réduire ce phénomène, suggèrent l'utilisation d'un outil équipé de 3 à 6 arêtes de coupe (composé de 3 arêtes principales et 3 arêtes secondaires). Ce type d'outil contribuerait à améliorer la circularité des trous grâce à sa rigidité accrue et une meilleure dissipation de la chaleur. De plus, les 3 arêtes secondaires, de forme concave, contribueraient à réduire le paramètre de rugosité R_a en atténuant l'effet de poussée sur la matière [16].

☛ Arrachements de fibres et de matrice

En ce qui concerne les arrachements de fibres et de matrice, ils constituent les défauts principaux observés sur la paroi des trous. Les premières études sur les mécanismes à l'origine de ces défauts d'usinage dans les matériaux composites remontent aux années 1980, avec les travaux de [23] et [24]. Ces recherches ont conduit à de nombreuses études ultérieures, dont celles menées par [25], [21], et [22]. Ces travaux ont permis d'identifier les principaux mécanismes de formation de la copie en fonction de l'angle entre la direction de la vitesse de coupe et la direction des fibres. Lorsque les fibres sont alignées à 0° par rapport à la direction de la vitesse de coupe (comme illustré dans la Figure II.27), elles sont "soulevées" par l'arête de coupe (et donc décollées de la matrice). Ensuite, elles peuvent soit être coupées par l'action de l'arête de coupe, soit être repoussées sous l'arête de coupe (ce phénomène étant d'autant plus marqué lorsque le rayon d'acuité de l'arête est important).

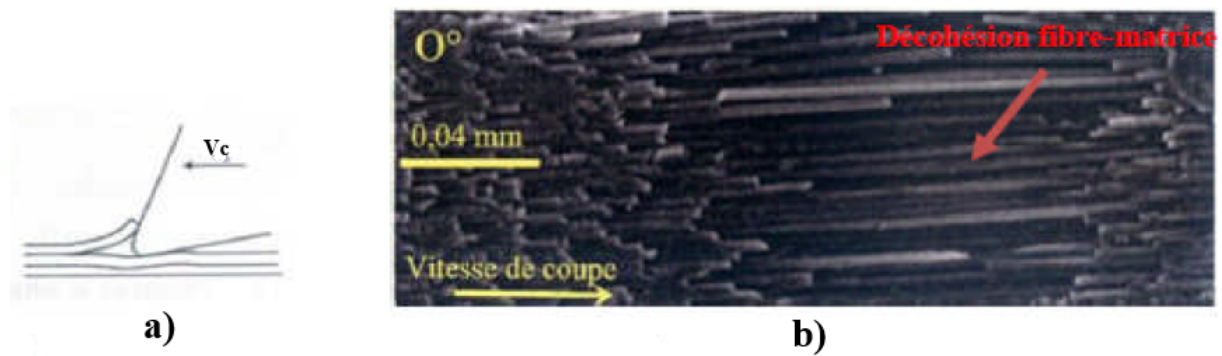


FIGURE II.27 – Fibres à 0° par rapport à V_c . a) Illustration de la pénétration de l'arête de coupe. b) Paroi de trou avec des fibres à 0° par rapport à V_c .

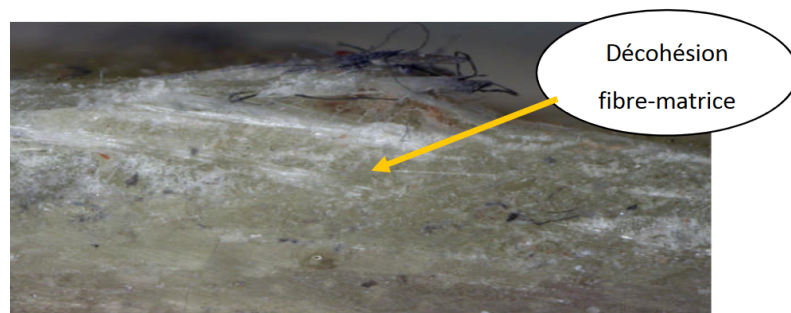


FIGURE II.28 – Dé cohésion fibre-matrice observé au microscope optique.

En situation où les fibres sont orientées à un angle de -45° par rapport à la direction de la vitesse de coupe, on observe un phénomène de flexion sous l'arête de coupe. Toutefois, cette flexion est restreinte par la présence des fibres situées en arrière-plan, et ainsi de suite. Lorsque les fibres atteignent leur limite de résistance à la flexion, l'ensemble finit par céder, ce qui se traduit par l'arrachement de groupes de fibres.

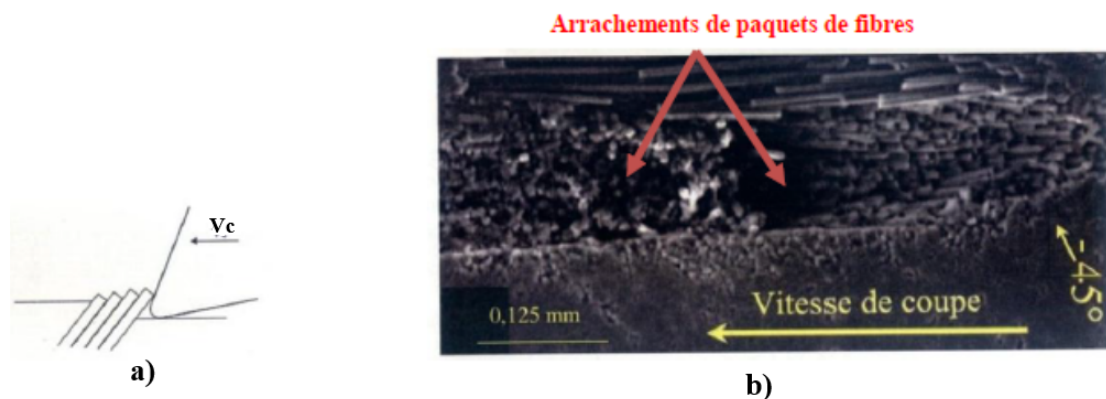


FIGURE II.29 – Fibres à -45° par rapport à V_c . a) Illustration de la pénétration de l'arête de coupe. b) Paroi de trou avec des fibres à -45° par rapport à V_c .

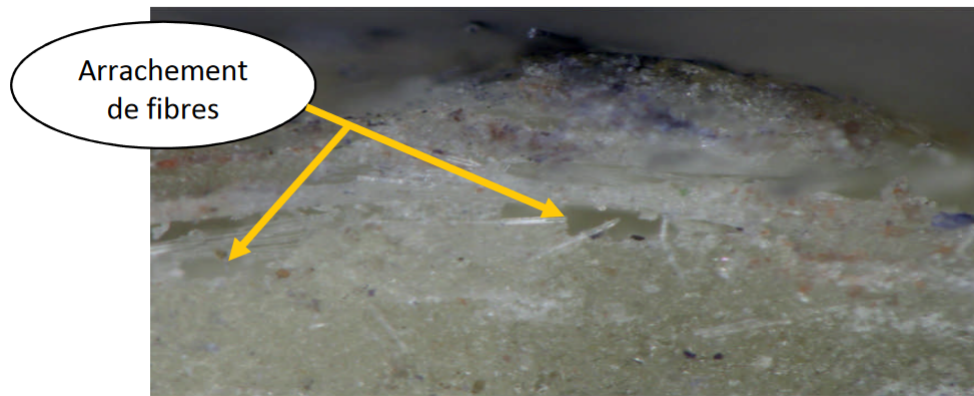


FIGURE II.30 – Arrachement de fibres observé au microscope optique.

Les fibres alignées à un angle de 90° par rapport à la direction de la vitesse de coupe subissent une contrainte de flexion considérable. Elles subissent une déformation élastique, puis sont coupées par l'arête de coupe. Ce processus de coupe induit une déformation ovale du trou, dont l'amplitude varie de $5\ \mu\text{m}$ à $0,2\ \text{mm}$ en fonction du rayon d'acuité des arêtes de coupe et de leur usure.

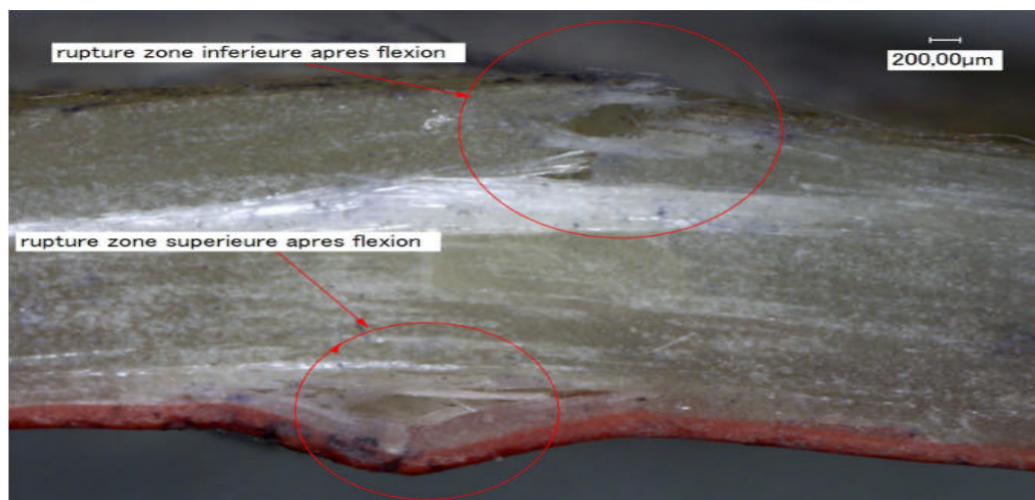


FIGURE II.31 – Rupture de fibres après flexion.

⊗ Les dégradations thermiques de la matrice

Ces anomalies surviennent lorsque la vitesse de rotation de l'outil atteint des niveaux très élevés. Cela engendre une élévation locale de la température de l'outil, provoquant une dégradation de la matrice, qui se traduit par l'apparition d'une coloration sombre à la surface du trou. La température critique de réticulation des matrices époxy est d'environ $180^\circ\ \text{C}$. Par conséquent, il est crucial que la température résultant du contact entre l'outil et le matériau pendant le processus de perçage ne dépasse pas la température de transition vitreuse de la matrice époxy. Ces défauts sont perceptibles à l'œil nu. Selon [21], cette dégradation thermique atteint son maximum lorsque l'angle entre l'axe des fibres et

la direction de coupe est de 110° .

* Défauts situés en sortie du trou

Généralement, à la sortie du trou, on observe principalement des dé-laminations qui résultent de la force de poussée exercée par le foret. Ce phénomène se produit lorsque le foret approche des dernières couches du stratifié, où la rigidité diminue. Lorsque la force de poussée dépasse une valeur critique, dépassant ainsi la force de cohésion entre les différentes couches, il se produit un décollement des couches et la propagation de fissures à travers le stratifié. Pour prévenir ce type de défaut, il est courant d'utiliser une contre-plaque suffisamment rigide en sortie du trou, ainsi que des paramètres de coupe adaptés.

De nombreuses études ont été menées pour prédire la valeur critique de l'effort de poussée en fonction des paramètres de coupe tels que la vitesse d'avance (V_f), le nombre de tours (N), le matériau à percer et la géométrie de l'outil (comme le diamètre de l'outil, entre autres). La majorité des chercheurs s'accordent à dire que la vitesse d'avance est le paramètre qui a le plus d'influence sur l'effort de poussée.

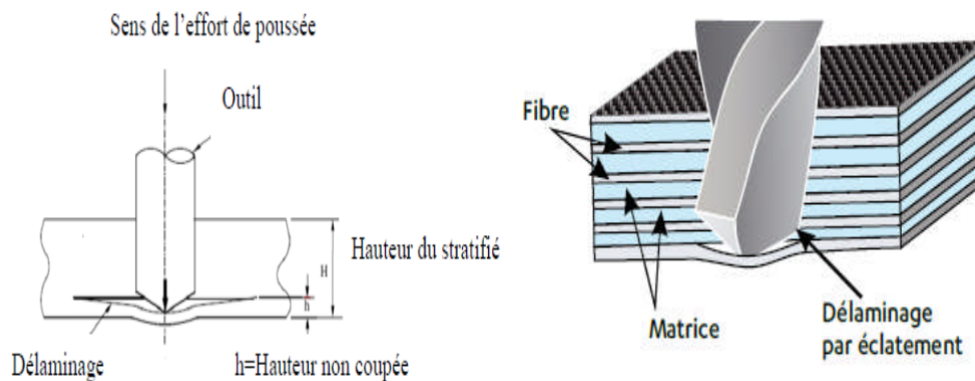


FIGURE II.32 – Initiation d'un délaminage en sortie du trou.

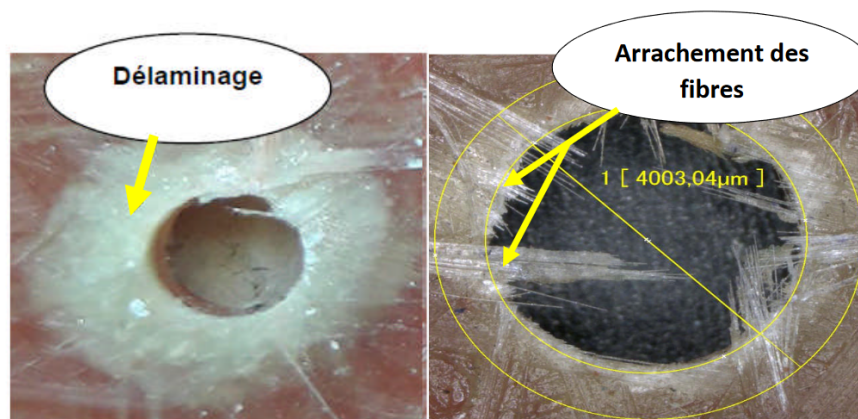


FIGURE II.33 – Défaut en sortie du trou.

II.10 Conclusion

Bien entendu, la fabrication des pièces à partir de matériaux composites ne vise pas à créer des finitions à l'aide d'outils tranchants. Cependant, une fois les pièces fabriquées, de nombreuses pièces composites nécessitent des opérations d'usinage telle que le perçage ou le fraisage. Le traitement de ces matériaux composites commence par la coupe des fibres du matériau, ce qui comporte un risque de dommage près de la zone de traitement. Par conséquent, il est essentiel d'étudier la nature et l'étendue des défauts introduits pendant les processus de forage.

CHAPITRE III

Partie expérimentale

III.1 Introduction

Dans cette partie nous abordons la fabrication et l'analyse des plaques en matériau composite. Nous analysons également l'influence des conditions de perçage, telles que le type, diamètre d'outil et la vitesse de coupe, sur l'effort de coupe. Ces études permettront de mieux comprendre les propriétés et la performance des matériaux composites.

III.2 Matériaux de l'étude

Les matériaux composites utilisés dans cette étude, proviennent d'entreprise ISELMAN (Ets. AMOKRANE Abdellah). Ils sont principalement destinés à la fabrication des bateaux de pêche et de plaisance (figure III.1). Les constituants de base de ces matériaux (résine et renfort) sont des produits commerciaux de composition chimique complexe. Ils sont principalement distingués à la fabrication de bateaux de pêche et de plaisance.



FIGURE III.1 – Domaine d'utilisation du matériau composite.

III.2.1 Constituants de matériau

*Matrice

Nous avons utilisé une matrice synthétique en polyester thermodurcissable.

*Renforts

Les types de renforts qui interviennent dans la fabrication de stratifié utilisé sont des fibres de verre de type E. Ils sont sous forme de mats et de tissus (figure III.2).



FIGURE III.2 – Les différents renforts utilisés; a) Mat $300\text{g}/\text{m}^2$, b) Mat $450\text{g}/\text{m}^2$, c) Taffetas $800\text{g}/\text{m}^2$

III.3 Élaboration des éprouvettes

Les plaques de stratifié ayant servi au découpage des éprouvettes sont obtenues par le même procédé de fabrication que celui utilisé pour les bateaux de pêche, à savoir, le moulage au contact (figure III.3). Le procédé est manuel, il consiste à nettoyer d'abord le moule avec de la cire (norpol FI-180-10) qui sert d'un agent de démoulage puis passer une fine couche de résine de surface colorée dénommée gel-coat et laisser le tous à température ambiante. Après 12 heures environ, on procède à la disposition des couches successives de renfort imprégnées, de la résine (mélangée à 1.5% du durcisseur) au moyen d'un pinceau et d'un d'ébulleur qui sert d'un compacteur et chasseur des bulles d'air. Pour les matériaux contenant du recyclé, à cette étape, on verse une couche du recyclé imprégné dans la résine à l'état pâteux. Il est commode de laisser à environ une demi-heure la première couche de renfort au contact avec le gel-coat. L'ensemble est maintenu dans cet état et à température ambiante pendant la polymérisation et jusqu'à la fin de la gélification qui dure à peu près une demi-journée. A la fin de la polymérisation nous procédons au démoulage.

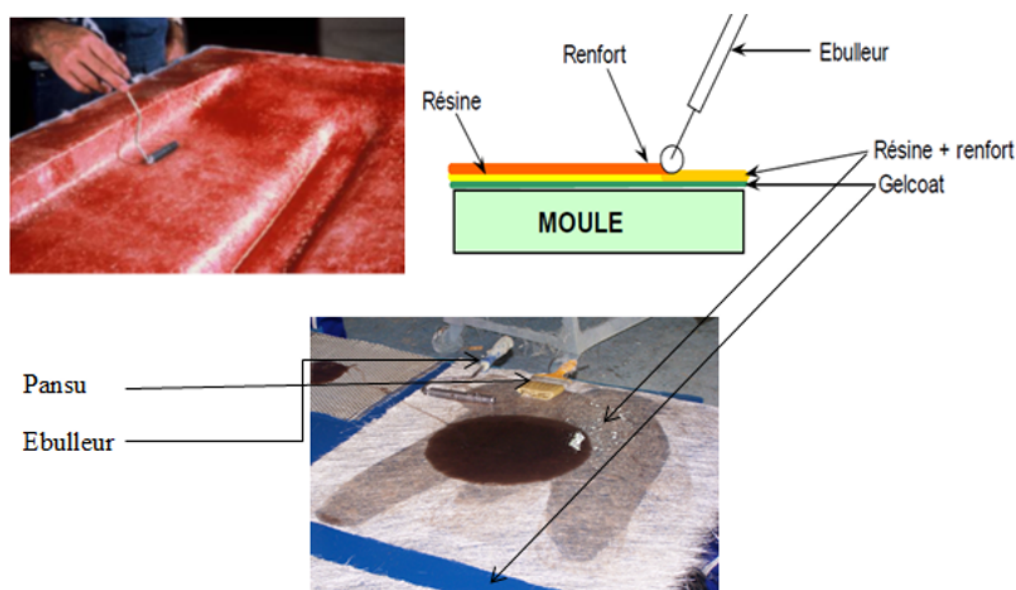


FIGURE III.3 – Moulage au contact

III.4 Découpage des éprouvettes

Cette opération a été réalisée à l'aide d'une scie à disque diamanté représentée dans la figure III.4.



FIGURE III.4 – Scie à disque diamanté.

III.5 Géométrie d'éprouvette de perçage

La géométrie des éprouvettes de perçage est donnée par la figure III.5 .

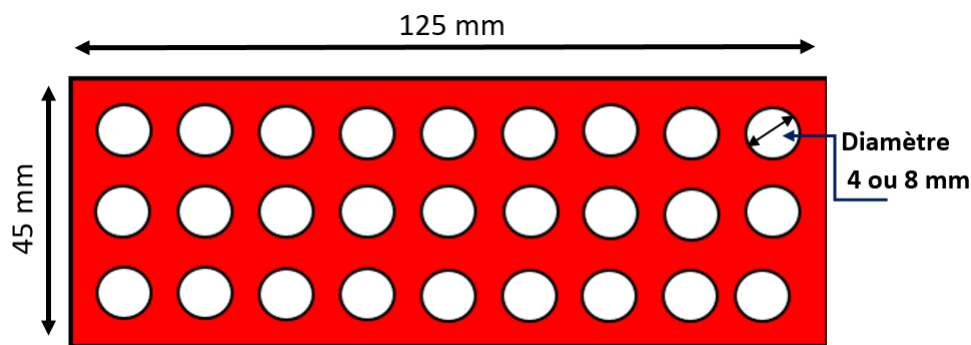


FIGURE III.5 – Géométrie d'éprouvette

Nous avons utilisé trois géométries d'outil différentes (foret : standard, 3 lèbres et 3 points), chacune ayant deux diamètres distincts (4 et 8 mm). Chaque combinaison d'outil et de diamètre a été testée à trois vitesses de coupe (20, 35 et 50 m/min) et vitesses d'avance différentes (0.02, 0.04, 0.08 et 0.12 mm/tr). Ainsi, nous avons exploré l'effet de ces variables sur le processus de perçage, en analysant les performances et les résultats obtenus pour chaque configuration d'outil et de vitesse. Le résumé des conditions de perçage sont donnés dans le tableau III.1 .

TABLE III.1 – Condition de perçage

Outil	Standard, 3 lèbres, 3 points					
	4			8		
Diamètre (mm)						
Vitesse de coupe (m/min)	20	35	50	20	35	50
Vitesse d'avance (mm/tr)	0.02	0.04	0.08	0.04	0.08	0.12

Le tableau III.2 représente les vues axiale et latérale des outils utilisés dans notre travail.

TABLE III.2 – Outils de perçage utilisés.

Foret	Vue axiale	Vue latérale
Standard (A 3185)		
3 lèvres (A 5830)		
3 points (A 5810)		

⊗ Fraiseuse

Nous avons utilisé dans cette étude une fraiseuse verticale semi-automatique

III.6 Paramètres de coupe et vitesses d'avance

Le tableau III.3 présente les différents paramètres de coupe et les vitesses d'avance utilisés dans cette étude pour différents diamètres de pièces usinées.

TABLE III.3 – Paramètres de coupe et vitesses d'avance pour différents diamètres et conditions de coupe

Test n°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	N (tr/min)	fv (mm/s)	fv (mm/min)	D (mm)
1	20	0,02	1592	0,53	31,83	4
2	35	0,02	2785	0,93	55,7	4
3	50	0,02	3979	1,33	79,58	4
4	20	0,04	1592	1,06	63,66	4
5	35	0,04	2785	1,86	111,41	4
6	50	0,04	3979	2,65	159,15	4
7	20	0,08	1592	2,12	127,32	4
8	35	0,08	2785	3,71	222,82	4
9	50	0,08	3979	5,31	318,31	4
10	20	0,04	796	0,53	31,83	8
11	35	0,04	1393	0,93	55,7	8
12	50	0,04	1989	1,33	79,58	8
13	20	0,08	796	1,06	63,66	8
14	35	0,08	1393	1,86	111,41	8
15	50	0,08	1989	2,65	159,15	8
16	20	0,12	796	1,59	95,49	8
17	35	0,12	1393	2,79	167,11	8
18	50	0,12	1989	3,98	238,73	8

Ces résultats semblent provenir d'une série de tests expérimentaux effectués sur une fraiseuse, où différentes combinaisons de paramètres ont été testées pour évaluer leur impact sur diverses mesures de performance.

Voici une analyse des données fournies :

- * **Test numéro (n°)** : Identifiant unique pour chaque test ;
- * **Vc (m/min)** : Vitesse de coupe en mètres par minute. C'est la vitesse à laquelle l'outil se déplace par rapport à la pièce ;
- * **f (mm/tr)** : Avance par dent en millimètres par tour. Il s'agit de la distance que l'outil avance à chaque tour complet ;
- * **N (tr/min)** : Vitesse de rotation de la pièce en tours par minute (tr/min) ;
- * **fv (mm/s)** : Vitesse d'avance en millimètres par seconde ;
- * **fv (mm/min)** : Vitesse d'avance en millimètres par minute ;
- * **D (mm)** : Diamètre de l'outil en millimètres.

Maintenant, pour analyser les données : On remarque que les tests ont été effectués avec trois niveaux différents de V_c (20, 35 et 50 m/min), des niveaux de f (0,02, 0,04, 0,08 ou 0,12 mm/tr), deux niveaux de N (1592, 2785, 3979 ou 796, 1393, 1989 tr/min), et deux niveaux de D (4 ou 8 mm).

Les valeurs de f_v (mm/s) sont calculées en multipliant f (mm/tr) par N (tr/min) et sont ensuite converties en (mm/min) pour faciliter la comparaison.

On peut constater que, en général, à mesure que V_c , f , N et D augmentent, les valeurs de f_v augmentent également. Cela est conforme aux attentes, car une augmentation de ces paramètres devrait généralement entraîner une augmentation de la vitesse d'avance.

Les tests semblent avoir été conçus pour explorer l'effet des différentes combinaisons de ces paramètres sur la vitesse d'avance. Par exemple, les tests 1 à 9 ont été effectués avec $D = 4$ mm, tandis que les tests 10 à 18 ont été effectués avec $D = 8$ mm .

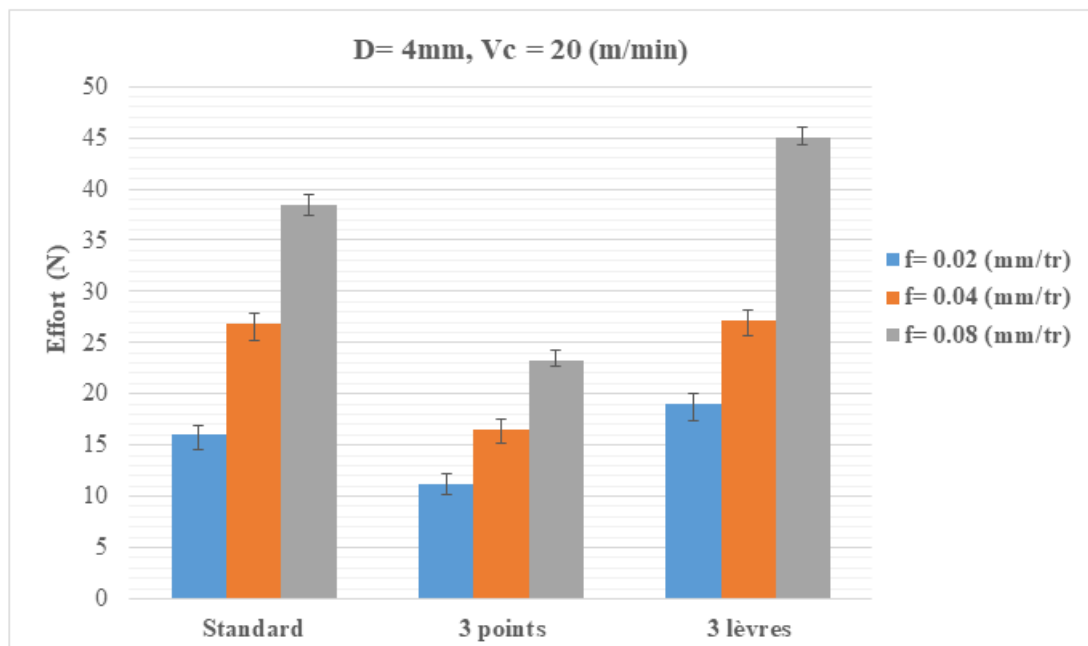
En conclusion, ces données expérimentales fournissent des informations importantes pour optimiser les opérations d'usinage en contrôlant les paramètres de coupe.

Les résultats obtenus sont présentés par les histogrammes suivantes :

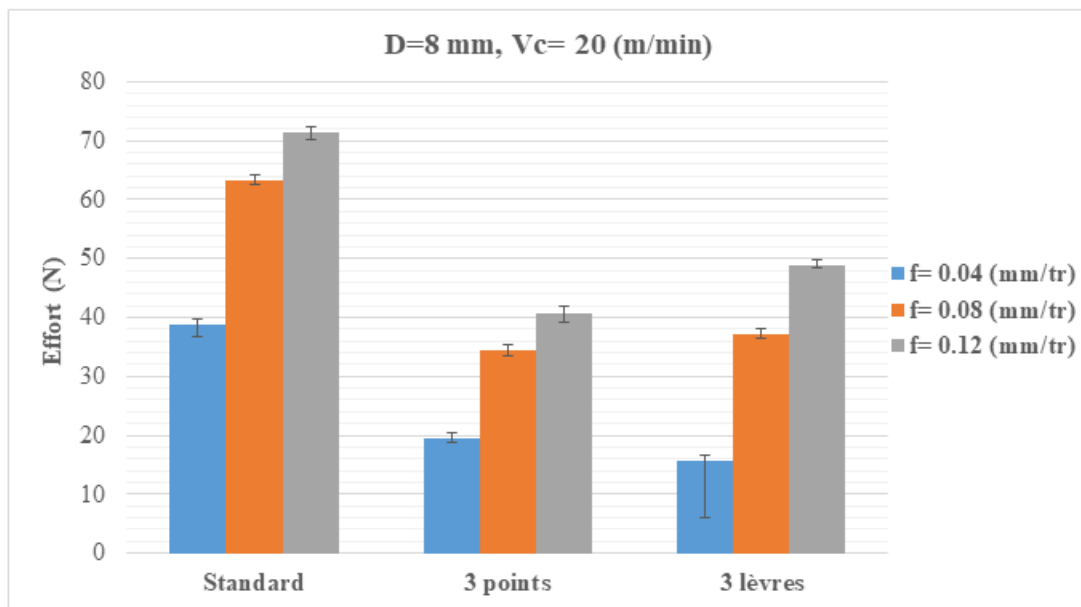
III.6.1 Influence de type de l'outil et de la vitesse d'avance sur l'effort de coupe

***Pour la vitesse de coupe = 20 (m/min)**

La figure III.6 représente l'influence de différent type d'outil sur l'effort de coupe, on varions la vitesse d'avance et on fixant la vitesse de coupe sur 20(m/min), pour les deux diamètres (4 et 8 mm).



(a)



(b)

FIGURE III.6 – Influence de type de l'outil et de la vitesse d'avance sur l'effort de coupe : (a) : D=4 mm, (b) : D=8 mm

D'après la figure III.6 (a) et (b) nous relevons que l'effort de coupe augmente proportionnellement en fonction de la vitesse d'avance pour la même géométrie, et pour les deux diamètres de l'outil utilisé.

La figure III.7 illustre l'effet de la vitesse d'avance sur le délaminage en sortie de trou en variant les vitesses d'avances et en fixant la vitesse de coupe à 20 (m/min).

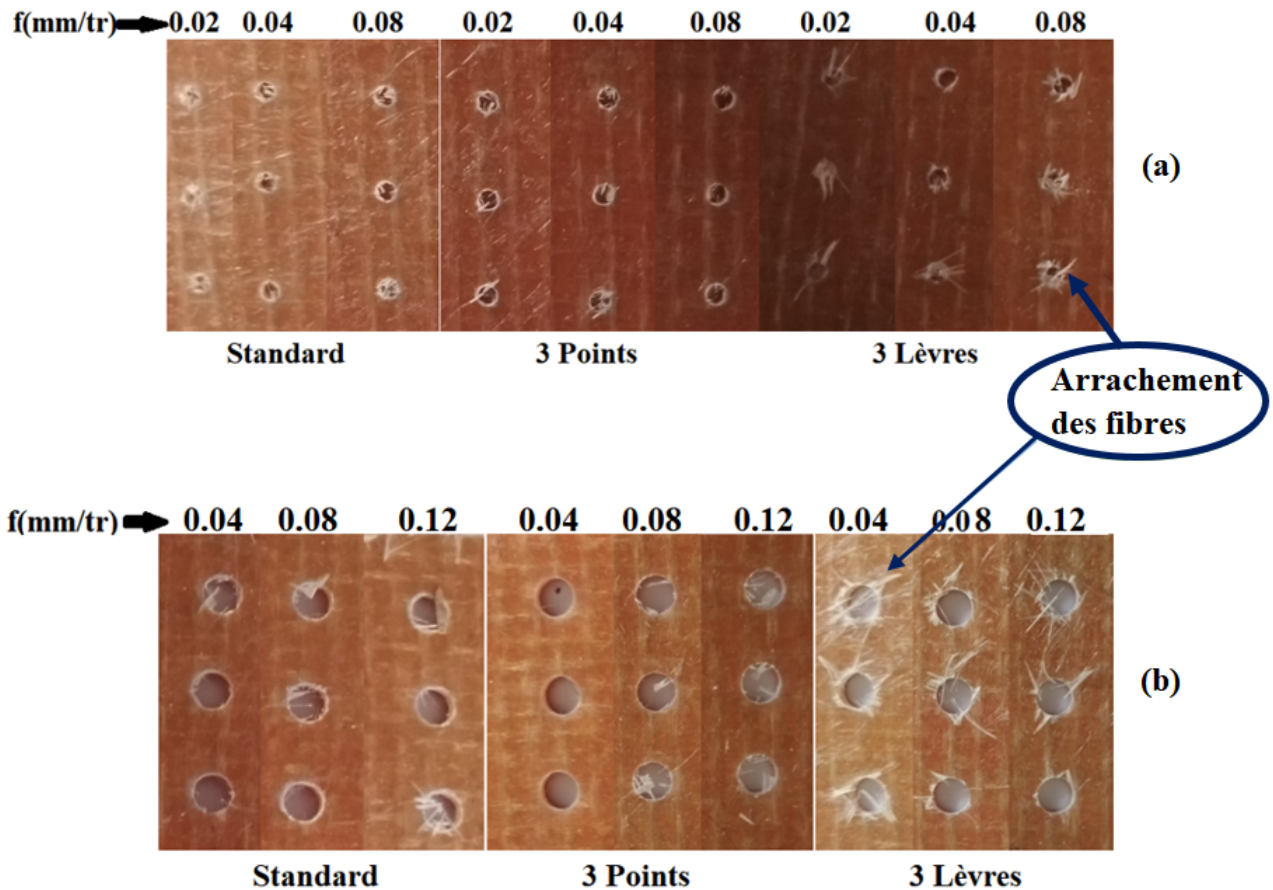


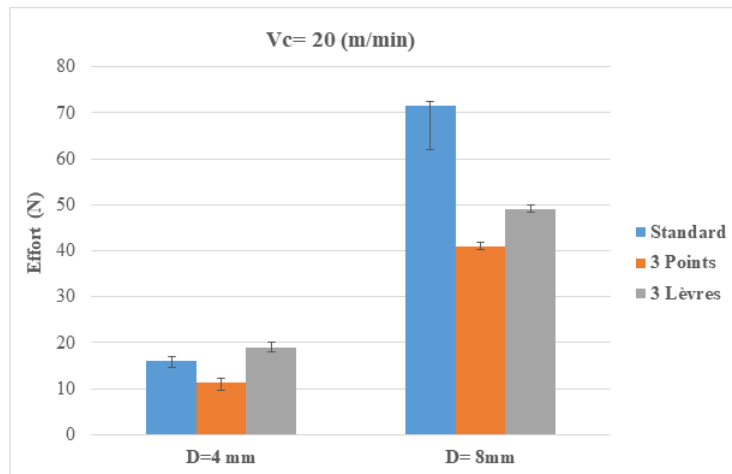
FIGURE III.7 – Perçage au diamètre 4 et 8 mm avec $V_c=20(m/min)$

✕ Interprétation des résultats

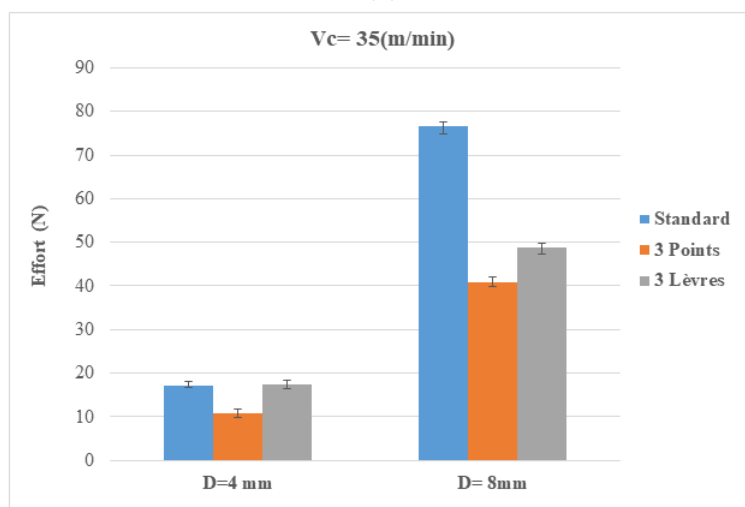
Nous constatons que la vitesse d'avance est un facteur très important dans le choix des conditions de coupe. En effet, on a déduit que lorsque celle-ci est élevée l'air de délaminage sera plus important. Mais lorsque le diamètre du trou est plus grand le délaminage est moins important.

III.6.2 Influence de diamètre et du type de l'outil sur l'effort de coupe

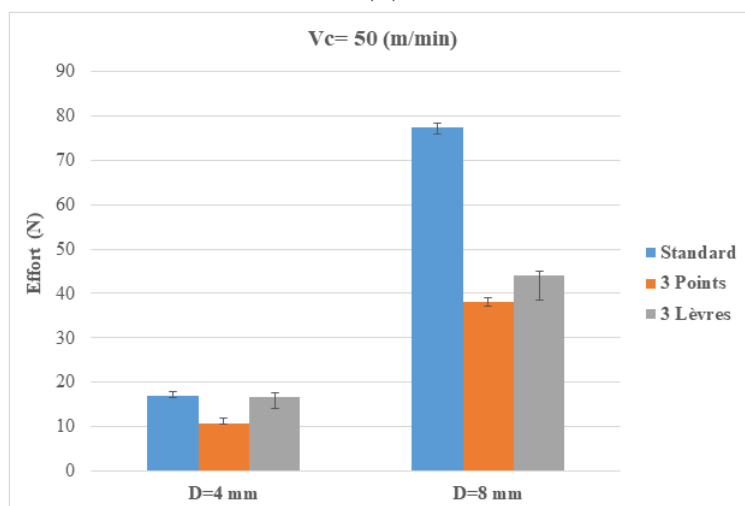
La figure III.8 représente l'influence de deux diamètres (4 et 8 mm) et du types d'outils (standard, 3 points et 3 lèvres) sur l'effort de coupe, on fixant la vitesse d'avance sur 0.02 (mm/tr) pour les différentes vitesses de coupe (20, 35 et 50 (m/min)).



(a)



(b)

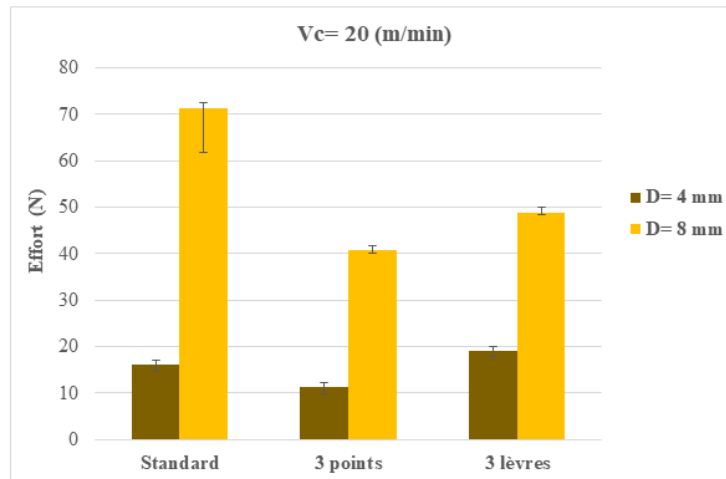


(c)

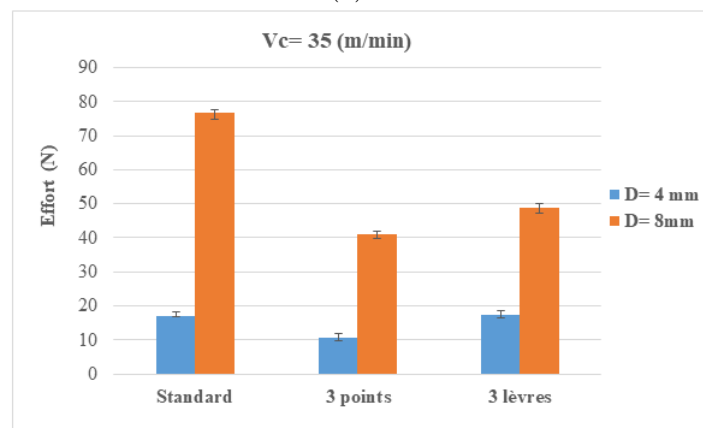
FIGURE III.8 – Influence de diamètre et du type de l'outil sur l'effort de coupe : (a) $V_c=20$ (m/min), (b) $V_c=35$ (m/min), (c) $V_c= 50$ (m/min)

D'après la figure III.8 (a), (b) et (c), nous pouvons constater que les efforts de coupe sont plus élevés pour un diamètre de 8 mm par rapport à un diamètre de 4 mm.

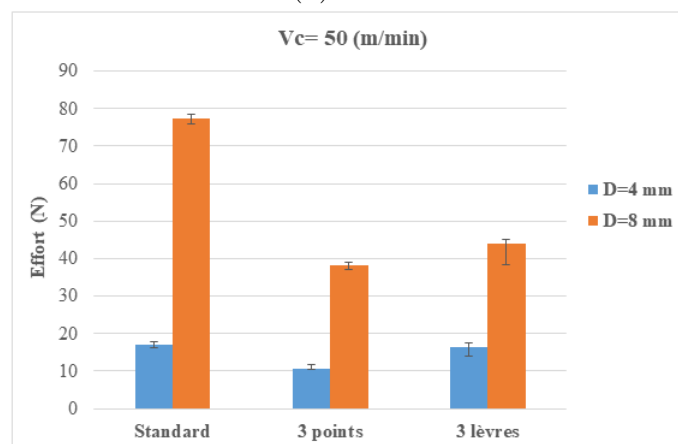
Cela suggère que les forces de coupe augmentent avec le diamètre de l'outil, ce qui est généralement attendu car un diamètre plus grand implique plus de matériau à enlever et donc une plus grande force requise pour le faire. La figure III.9 représente l'influence du types d'outils (standard, 3 points et 3 lèvres) et deux diamètres (4 et 8 mm) sur l'effort de coupe, on fixant la vitesse d'avance sur 0.02 (mm/tr) pour les différentes vitesses de coupe (20, 35 et 50 (m/min)).



(a)



(b)



(c)

FIGURE III.9 – Influence de diamètre et du type de l'outil sur l'effort de coupe : (a) $V_c=20$ (m/min) , (b) $V_c= 35$ (m/min) , (c) $V_c= 50$ (m/min)

En comparant les efforts de coupe pour les trois outils avec les deux diamètres (4 et 8 mm), nous pouvons observer que l'outil 3 points nécessite le moins d'effort de coupe parmi les trois, suivi par l'outil 3 lèvres, puis l'outil standard qui nécessite le plus d'effort de coupe.

Cette comparaison indique que les différentes configurations d'outils de diamètre 4 et 8 mm ont des performances variables en termes d'effort de coupe, ce qui peut être influencé par des facteurs tels que le matériau de l'outil, sa géométrie, ou les conditions de coupe.

Donc, on peut conclure que pour des outils de diamètre 4 et 8 mm, le foret 3 points nécessite le moins d'effort de coupe. Cela signifie que ce dernier est potentiellement plus efficace ou plus adapté à la tâche de coupe par rapport aux autres.

III.6.3 Influence de la vitesse de coupe et le type de l'outil sur l'effort de coupe

* Avance= 0.02 (mm/tr), D=4 mm

La figure III.10 représente l'influence de la vitesse de coupe (20, 35 et 50 (m/min)) et le type d'outil sur l'effort de coupe avec le diamètre 4 mm et la vitesse d'avance 0.02 (mm/tr).

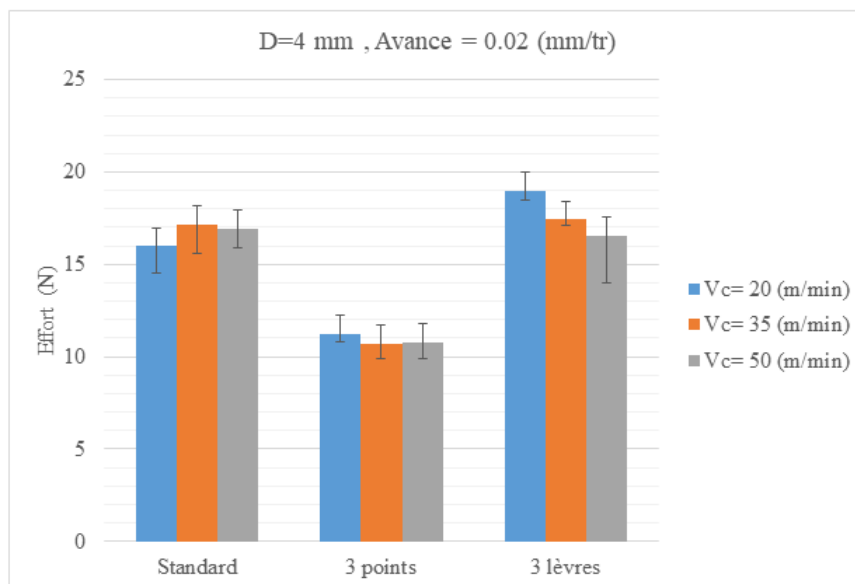


FIGURE III.10 – Influence de la vitesse de coupe et le type de l'outil sur l'effort de coupe

Comparons les efforts de coupe pour chaque configuration d'outil à différentes vitesses de coupe ($V_c = 20, 35$ et 50 (m/min)) avec une avance de $0,02$ (mm/tr) et un diamètre d'outil (D) de 4 mm :

* Pour l'outil standard , l'effort de coupe varie légèrement mais reste globalement similaire à toutes les vitesses de coupe ;

- * Pour l'outil 3 points, l'effort de coupe diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe, mais les variations sont relativement faibles ;
- * Pour l'outil 3 lèvres, l'effort de coupe semble diminuer à mesure que la vitesse de coupe augmente, bien que la variation ne soit pas uniforme entre toutes les vitesses de coupe.

L'outil 3 points semble offrir les efforts de coupe les plus faibles parmi les trois configurations d'outils à toutes les vitesses de coupe testées. Cela suggère que la configuration à 3 points pourrait être plus efficace pour percer un matériau composite avec une avance de 0,02 (mm/tr) et un diamètre d'outil de 4 mm. L'outil standard présente des efforts de coupe relativement stables à travers les différentes vitesses de coupe. Bien que ces valeurs ne soient pas les plus faibles, la stabilité des performances pourrait être un facteur important dans certaines applications où des performances constantes sont essentielles.

L'outil 3 lèvres montre des efforts de coupe plus élevés que les deux autres outils, bien que légèrement inférieurs à l'outil Standard. Cependant, la variation de l'effort de coupe avec la vitesse de coupe n'est pas uniforme, ce qui pourrait rendre cette outil moins prévisible dans certaines conditions de coupe.

La figure III.11 illustrent l'effet de la vitesse de coupe sur le délaminage de sortie de trou en variant la vitesse de coupe et en fixant l'avance à 0.02 (mm/tr).

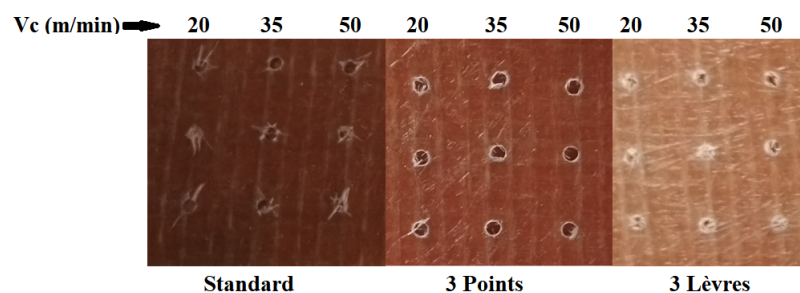


FIGURE III.11 – Perçage au diamètre 4 mm avec une avance de 0.02 (mm/tr)

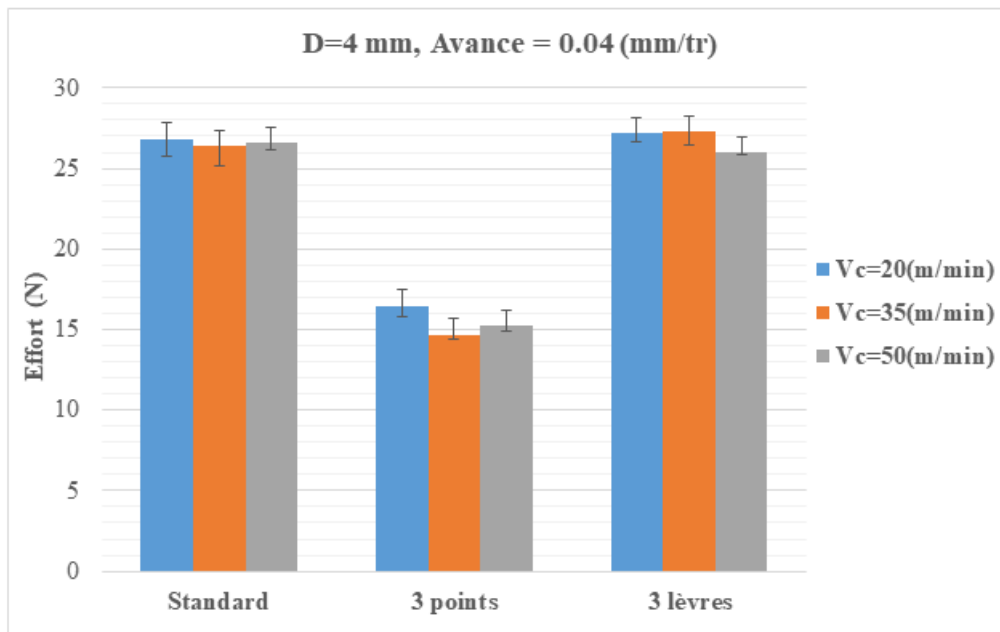
✧ Interprétation des résultats

Nous constatons à travers ces précédente plaques percées que la taille du délaminage diminue lorsque la vitesse de coupe augmente, et on peut voir clairement que l'outil 3 points a de faible zones d'arrachement des fibres par rapport aux autre outils.

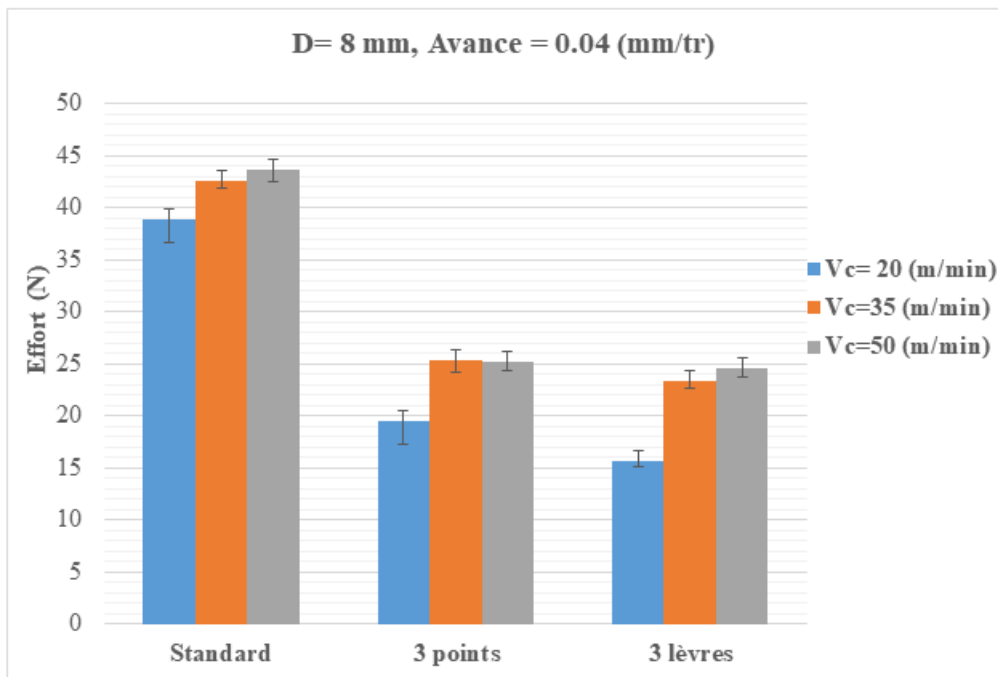
En conclusion, pour percer un matériau composite avec une avance de 0,02 (mm/tr) et un diamètre d'outil de 4 mm, l'outil 3 points semble offrir les meilleures performances en termes d'effort de coupe.

* Avance= 0.04 (mm/tr), D=4 et 8 (mm)

La figure III.12 représente l'influence de la vitesse de coupe (20, 35 et 50 (m/min)) et le type d'outil sur l'effort de coupe avec les diamètres (4 et 8 mm) et la vitesse d'avance 0.04 (mm/tr).



(a)



(b)

FIGURE III.12 – Influence de la vitesse de coupe et le type de l’outil sur l’effort de coupe :
 (a) D=4 mm, (b) D=8 mm

✱ Analyse des performances des forets

➤ Le foret standard

Pour **D=4 mm**, l’effort de coupe semble relativement stable à toutes les vitesses de coupe, avec des valeurs comprises entre environ 26,4 et 26,8 N.

Pour **D=8 mm**, l’effort de coupe augmente avec la vitesse de coupe, passant d’environ

38,9 à 43,7 N. Cela peut indiquer une plus grande influence de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe pour un diamètre d'outil plus grand.

► Le foret 3 points

Pour $D=4$ mm, l'effort de coupe varie entre 14,7 et 16,5 N, avec une tendance à diminuer légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

Pour $D=8$ mm, l'effort de coupe est relativement stable à toutes les vitesses de coupe, sauf à $V_c=50$, où il augmente significativement à environ 25,3 N.

► Le foret 3 lèvres

Pour $D=4$ mm, l'effort de coupe semble fluctuer légèrement, avec une légère diminution à $V_c=50$ (m/min).

Pour $D=8$ mm, l'effort de coupe augmente avec la vitesse de coupe, passant d'environ 15,7 à 24,5 N, montrant une plus grande sensibilité à la vitesse de coupe par rapport aux autres configurations.

En analysant les données fournies, pour percer un matériau composite avec une avance de 0,04 (mm/tr) et des diamètres d'outil de 4 mm et 8 mm, nous pouvons identifier l'outil qui semble offrir les meilleures performances en termes d'effort de coupe.

* Pour un diamètre d'outil de 4 mm

L'outil 3 points semble offrir les meilleures performances en termes d'effort de coupe, avec des valeurs d'effort de coupe plus faibles que les autres outils à toutes les vitesses de coupe testées. Il peut donc être considéré comme le meilleur choix pour cette situation spécifique.

* Pour un diamètre d'outil de 8 mm

Pour les vitesses de coupe plus basses ($V_c=20$ et 35 (m/min)), l'outil 3 points offre également les meilleures performances en termes d'effort de coupe. Cependant, à la vitesse de coupe de $V_c=50$ (m/min), l'outil standard montre des valeurs légèrement plus élevées mais comparables à celles de 3 points. Ainsi, dans ce cas, l'outil 3 points reste un choix solide en raison de ses performances globalement bonnes.

La figure III.13 illustre l'effet de la vitesse de coupe sur le délaminage de sortie de trou en variant la vitesse de coupe et en fixant la vitesse d'avance à 0.04 (mm/tr).

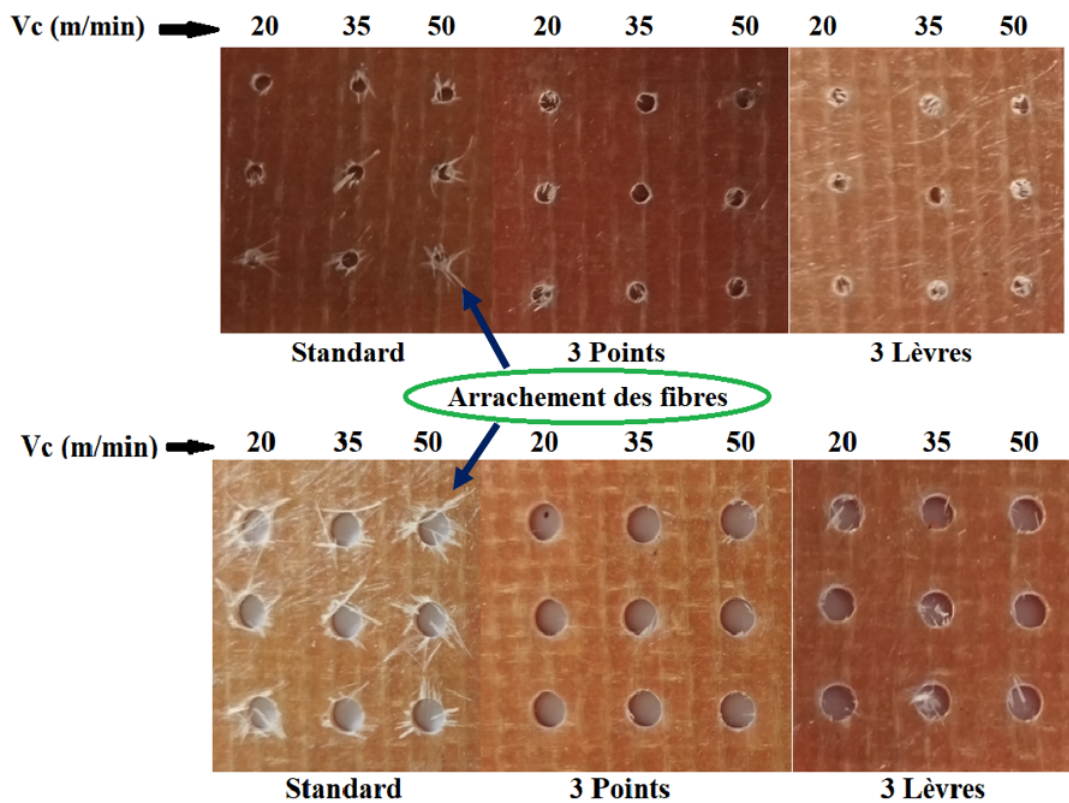


FIGURE III.13 – Perçage au diamètre 4 et 8 mm avec une avance de 0.04 (mm/tr)

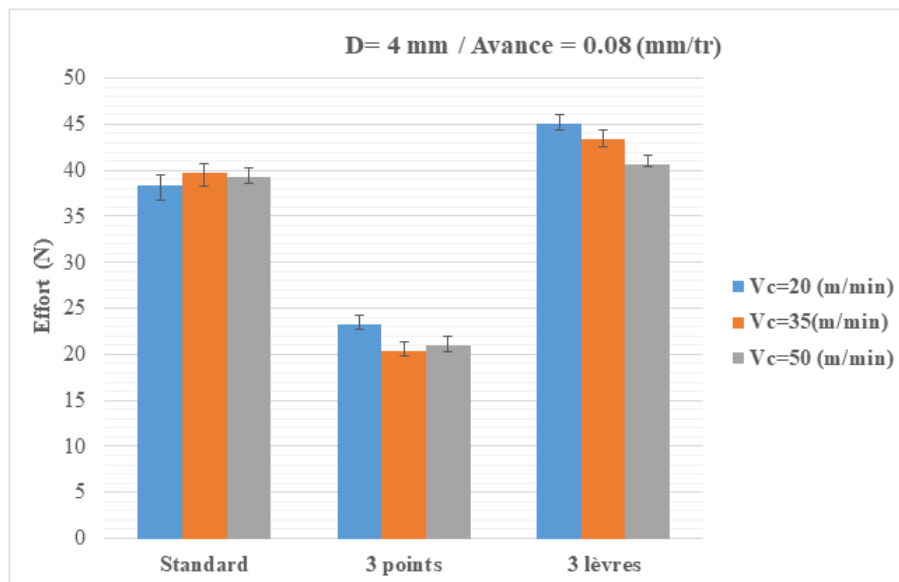
⊗ Interprétation des résultats

Nous constatons à travers ces précédente plaques percées que la taille du délaminage diminue lorsque la vitesse de coupe augmente, mais aussi le diamètre du trou et ça conséquence non négligeable sur le dé laminage, plus celui-ci est grand plus le délaminage est moins important.

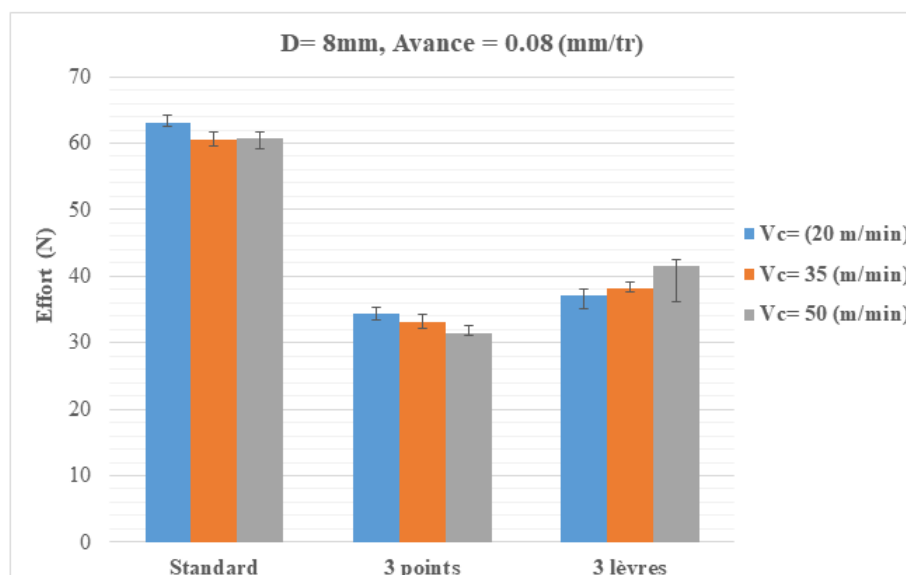
En conclusion, pour percer un matériau composite avec une avance de 0,04 mm/tr et des diamètres d'outil de 4 mm et 8 mm, la foret 3 points semble offrir les meilleures performances en termes d'effort de coupe, offrant ainsi un compromis entre efficacité de coupe et stabilité du processus.

★ Avance= 0.08 (mm/tr), D= 4 et 8 (mm)

La figure III.14b représente l'influence de la vitesse de coupe (20, 35 et 50 (m/min)) et le type d'outil sur l'effort de coupe avec les diamètres (4 et 8 mm) et la vitesse d'avance 0.08 (mm/tr).



(a)



(b)

FIGURE III.14 – Influence de la vitesse de coupe et le type de l'outil sur l'effort de coupe : (a) D=4 mm , (b) D=8 mm

* Pour D=4 mm :

⊗ L'outil standard

Les valeurs d'effort de coupe augmentent légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Cependant, les variations ne sont pas très significatives entre les différentes vitesses de coupe.

Les valeurs d'effort de coupe se situent généralement entre 38,42 N et 39,71 N, avec une légère baisse à $V_c=20$ (m/min) et une légère augmentation à $V_c=35$ (m/min), suivie d'une légère baisse à $V_c=50$ (m/min).

⊗ L'outil 3 points

Cette configuration d'outil montre les valeurs d'effort de coupe les plus basses parmi les trois configurations, ce qui suggère une meilleure efficacité de coupe.

Les valeurs d'effort de coupe diminuent globalement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. À $V_c=50$, l'effort de coupe est le plus faible avec 20,91 N, tandis qu'il est le plus élevé à $V_c=20$ avec 23,22 N.

⊗ L'outil 3 lèvres

Cette configuration d'outil présente généralement les valeurs d'effort de coupe les plus élevées parmi les trois configurations, indiquant une résistance accrue lors de la coupe.

Contrairement à la configuration Standard, les valeurs d'effort de coupe pour la configuration 3 lèvres diminuent légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Cependant, la réduction n'est pas aussi uniforme que dans le cas de la configuration 3 points.

*** Pour $D=8$ mm****⊗ L'outil standard**

Comme pour $D=4$ mm, les valeurs d'effort de coupe augmentent légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe, bien que les variations entre les vitesses de coupe ne soient pas très significatives.

Les valeurs d'effort de coupe sont plus élevées que pour $D=4$ mm, variant entre 60,62 N et 63,15 N.

⊗ L'outil 3 points

Tout comme pour $D=4$ mm, cette configuration d'outil montre les valeurs d'effort de coupe les plus basses parmi les trois configurations.

Les valeurs d'effort de coupe diminuent globalement avec l'augmentation de la vitesse de coupe, passant de 34,32 N à $V_c=20$ (m/min) à 31,47 N à $V_c=50$ (m/min).

⊗ L'outil 3 lèvres

Contrairement à $D=4$ mm, les valeurs d'effort de coupe pour l'outil « 3 lèvres » augmentent généralement avec l'augmentation de la vitesse de coupe pour $D=8$ mm.

Les valeurs d'effort de coupe sont les plus faibles à $V_c=20$ (m/min) avec 37,06 N, et augmentent progressivement pour atteindre 41,57 N à $V_c=50$ (m/min).

La figure III.15 montre l'effet de la vitesse de coupe sur le délaminage de sortie de trou en variant la vitesse de coupe et en fixant la vitesse d'avance à 0.08 (mm/tr).

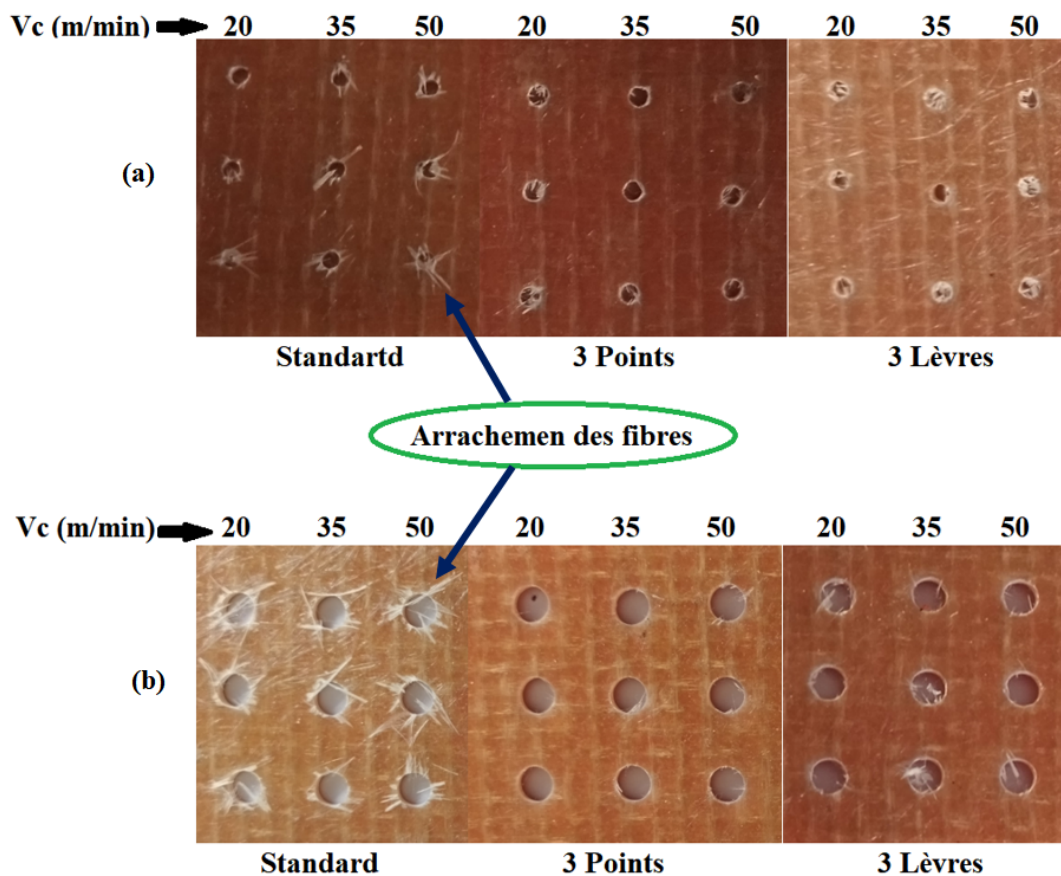


FIGURE III.15 – Perçage au diamètre 4 et 8mm avec une avance de 0.08 (mm/tr)

✧ Interprétation des résultats

On observe des niveaux variés d'arrachement des fibres selon le type de foret et la vitesse de coupe.

- Foret standard : montre un arrachement plus prononcé des fibres.
- Foret 3 points : présente le moins d'arrachement des fibres parmi les trois types.
- Foret 3 lèvres : montre moins d'arrachement des fibres comparé au foret standard, mais des traces d'arrachage sont encore visibles.

On trouve que l'augmentation de la vitesse de coupe tend à augmenter l'arrachement des fibres pour une avance de 0.08 (mm/tr).

En résumé, les configurations d'outil 3 points tendent à offrir les efforts de coupe les plus faibles, suivies de près par la configuration standard, tandis que l'outil 3 lèvres nécessite généralement plus d'effort pour la coupe. Les variations d'effort de coupe avec la vitesse de coupe et le diamètre d'outil indiquent des interactions complexes entre ces paramètres qui peuvent influencer les performances de coupe.

* Avance= 0.12 (mm/tr), et D= 8 (mm)

La figure III.16 représente l'influence de la vitesse de coupe (20, 35 et 50 (m/min)) et le type d'outil sur l'effort de coupe avec le diamètre 8 mm et la vitesse d'avance 0.12 (mm/tr).

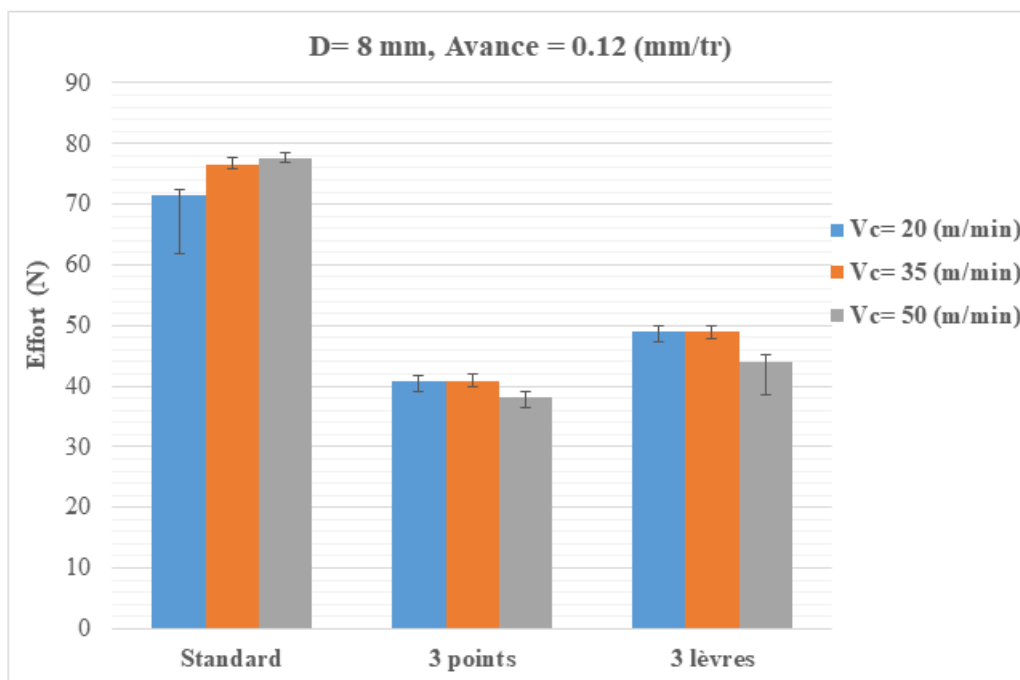


FIGURE III.16 – Influence de la vitesse de coupe et le type de l’outil sur l’effort de coupe

✱ Analyse des performances des forets

Ces données montrent les efforts de coupe pour chaque configuration d’outil à différentes vitesses de coupe ($V_c = 20, 35$ et 50 (m/min)).

► L’outil standard

Les efforts de coupe augmentent de manière significative avec l’augmentation de la vitesse de coupe. Les valeurs varient de $71,42$ N à $V_c=20$ (m/min) jusqu’à $77,49$ N à $V_c=50$ (m/min). Cela suggère que cette configuration d’outil nécessite une force de coupe plus importante à des vitesses de coupe plus élevées.

► L’outil 3 points

Les valeurs d’effort de coupe restent relativement stables à travers les différentes vitesses de coupe. Elles varient de $40,81$ N à $V_c=20$ (m/min) jusqu’à $38,11$ N à $V_c=50$ (m/min). Cela indique une certaine stabilité de cette configuration d’outil indépendamment de la vitesse de coupe.

► L’outil 3 lèvres

Les valeurs d’effort de coupe diminuent également avec l’augmentation de la vitesse de coupe, bien que la diminution ne soit pas aussi prononcée que pour la configuration 3 Points. Les valeurs varient de $48,90$ N à $V_c=20$ (m/min) jusqu’à $44,11$ N à $V_c=50$ (m/min). Cette configuration montre un schéma similaire à la configuration standard, mais avec des valeurs d’effort de coupe plus faibles dans l’ensemble.

la figure III.17 présente l'effet de la vitesse de coupe sur le délaminage de sortie de trou en variant la vitesse de coupe et en fixant l'avance sur 0.12 (mm/tr).

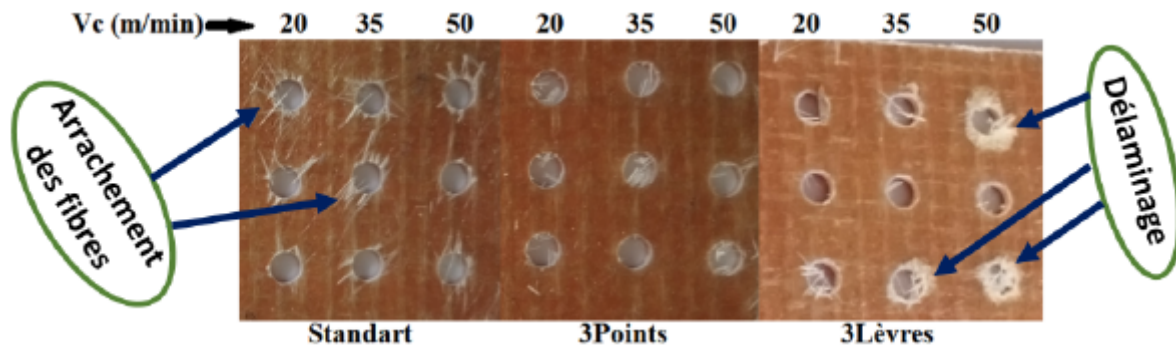


FIGURE III.17 – Percage au diamètre 8 mm avec une avance de 0.12 (mm/tr)

✧ Interprétation des résultats

- Foret standard : montre un arrachement significatif des fibres.
- Foret 3 points : montre un arrachement des fibres réduit par rapport au foret standard.
- Foret 3 lèvres : montre un délaminage à une vitesse de 50 m/min, indiquant que ce type de foret peut provoquer ce type de défaut à des vitesses élevées.

Donc, l'augmentation de la vitesse de coupe tend à augmenter l'arrachement des fibres pour tous les types de forets à une avance de 0.12 (mm/tr).

En résumé, les configurations d'outil 3 points et 3 lèvres semblent offrir des efforts de coupe plus stables par rapport à la vitesse de coupe, tandis que la configuration standard montre une augmentation notable des efforts de coupe avec des vitesses de coupe plus élevées. Cela souligne l'importance de choisir la bonne configuration d'outil en fonction des conditions de coupe spécifiques pour optimiser les performances de coupe.

✧ Conclusions

Les résultats de cette étude mettent en lumière l'importance cruciale de plusieurs paramètres dans le processus de percage des matériaux composites, notamment la vitesse de coupe, le diamètre de l'outil et le type d'outil utilisé. Regardons de plus près les conclusions tirées de chaque section :

1) Influence de la vitesse d'avance et du diamètre de l'outil sur l'effort de coupe

L'effort de coupe augmente proportionnellement avec la vitesse d'avance pour une géométrie d'outil donnée, et ce pour les deux diamètres testés. Cette corrélation directe

suggère qu'une augmentation de la vitesse d'avance exige une plus grande force pour le processus de coupe.

Les efforts de coupe sont également plus élevés pour un diamètre d'outil de 8 mm par rapport à 4 mm, ce qui est cohérent avec l'intuition, car un plus grand diamètre implique plus de matériau à enlever et donc une force de coupe accrue.

2) Influence du type d'outil sur l'effort de coupe

L'outil 3 points se distingue en nécessitant le moins d'effort de coupe parmi les trois configurations testées, suivi de l'outil standard et enfin de l'outil 3 lèbres. Ces différences dans les performances d'effort de coupe peuvent être attribuées aux variations dans la géométrie de l'outil et aux propriétés du matériau utilisé.

L'outil 3 points se révèle être le choix le plus efficace pour les diamètres d'outil de 4 mm et 8 mm, offrant des performances stables et réduisant l'effort de coupe global.

3) Interaction entre la vitesse de coupe, le diamètre de l'outil et le type d'outil

Les configurations d'outil 3 points tendent à offrir les efforts de coupe les plus faibles dans la plupart des conditions testées, avec des performances stables indépendamment de la vitesse de coupe. Cela suggère une efficacité constante de cet outil dans une gamme de situations de coupe.

L'outil standard montre des performances intermédiaires, offrant une stabilité dans les efforts de coupe mais nécessitant plus de force à des vitesses de coupe plus élevées.

L'outil 3 lèbres présente généralement les efforts de coupe les plus élevés et une sensibilité accrue à la vitesse de coupe, ce qui en fait un choix moins optimal dans de nombreuses situations de coupe.

4) Influence de la vitesse de coupe et du diamètre de l'outil sur le délaminage en sortie de trou

La taille du délaminage diminue lorsque la vitesse de rotation augmente. Le diamètre du trou, plus est grand le délaminage est moins important. Le diamètre du trou est inversement proportionnel au délaminage.

5) Influence de la vitesse d'avance et du diamètre de l'outil sur le délaminage en sortie de trou

La vitesse d'avance est un facteur très important dans le choix des conditions de coupe. En effet, on a déduit que lorsque celle-ci est élevée l'air de délaminage sera plus important.

Enfin, un trou de bonne qualité est obtenu pour une vitesse de rotation élevée et une avance faible pour les deux diamètres.

III.6.4 Conclusion

En conclusion, l'exploration de l'effort de coupe dans l'usinage des matériaux composites à travers différentes configurations d'outils, vitesses de coupe et diamètres d'outil révèle des insignes précieux pour l'optimisation des processus industriels. Les résultats mettent en évidence l'importance cruciale de la sélection appropriée de l'outil en fonction des conditions spécifiques de coupe.

Les observations indiquent que l'outil 3 points émerge comme le choix le plus efficace, offrant des efforts de coupe réduits et une stabilité remarquable dans une gamme variée de conditions. Cette conclusion souligne l'impact significatif de la géométrie d'outil sur les performances d'usinage.

Toutefois, il est également essentiel de reconnaître les nuances dans les performances des autres configurations d'outils. L'outil standard offre une stabilité appréciable dans les efforts de coupe, tandis que l'outil "3 lèvres" présente une sensibilité accrue à la vitesse de coupe et des performances globalement inférieures.

En résumé, les résultats démontrent la nécessité de prendre en compte divers facteurs lors de la sélection de l'outil pour l'usinage des matériaux composites. Une approche stratégique prenant en considération la vitesse de coupe, le diamètre de l'outil et le type d'outil permettra d'optimiser les performances de coupe tout en garantissant une efficacité et une stabilité maximales du processus d'usinage.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, ce mémoire a exploré en profondeur les différentes facettes de l'usinage des matériaux composites, en se concentrant sur l'analyse de l'effort de coupe à travers divers paramètres tels que la vitesse de coupe, le diamètre de l'outil et le type d'outil. Les résultats obtenus ont apporté des éclaircissements significatifs sur l'impact de ces facteurs sur les performances d'usinage et ont souligné l'importance d'une approche stratégique dans la sélection de l'outil pour garantir une efficacité et une stabilité maximales du processus.

L'étude a démontré que la vitesse de coupe, bien qu'important, doit être considérée en conjonction avec d'autres paramètres tels que le diamètre de l'outil et le type d'outil pour obtenir des performances optimales. Les configurations d'outil 3 points se sont avérées particulièrement efficaces dans plusieurs scénarios, offrant des efforts de coupe réduits et une stabilité remarquable. Cependant, il est crucial de reconnaître les nuances dans les performances des différentes configurations d'outils et d'adapter judicieusement la sélection de l'outil en fonction des conditions spécifiques de coupe.

Ce mémoire souligne l'importance de la recherche continue et de la collaboration entre l'industrie et le monde universitaire pour relever les défis actuels et futurs dans le domaine de l'usinage des matériaux composites. En intégrant les connaissances théoriques, les méthodes d'analyse avancées et l'expérience pratique, nous pouvons progresser vers des techniques d'usinage plus efficaces, durables et respectueuses de l'environnement, contribuant ainsi à l'avancement de l'industrie manufacturière dans son ensemble.

Les perspectives de ce travail qui peuvent être envisagées vis-à-vis le perçage sont :

- * Etude des efforts de coupe à l'aide des machines adaptées (fraiseuse ou perceuse à table dynamométrique).
- * L'utilisation des lubrifiants spécialement conçus pour les composites, ainsi accroître la durée de vie des outils.
- * L'observation des défauts engendrés lors de l'usinage avec un microscope électronique à balayage afin de mieux quantifier ces défauts notamment au niveau de la paroi du trou.

Bibliographie

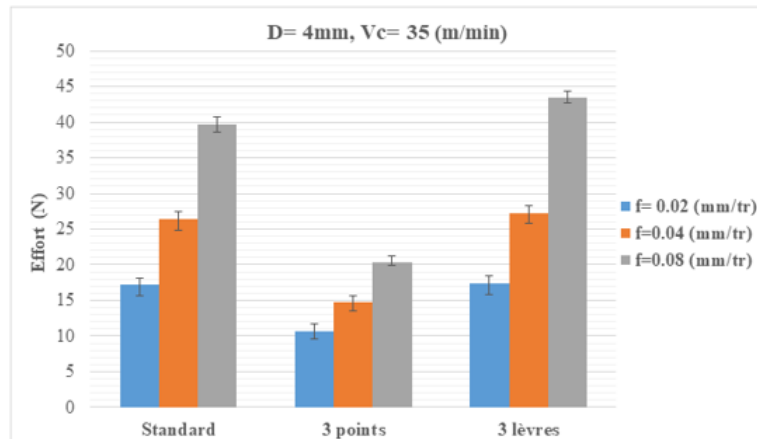
- [1] Pierre Jacquinet. Utilisation des matériaux composites. Hermès, 1991.
- [2] Jérémie Aucher. Etude comparative du comportement composites ‘a matrice thermoplastique ou thermodurcissable. PhD thesis, INSA de Rouen, 2009.
- [3] Yohann Ledru. ETUDE DE LA POROSITE DANS LES MATERIAUX COMPOSITES STRATIFIES AERONAUTIQUES.
- [4] M Carma. Glossaire des matériaux composites. Centre d’Animation Régional en Matériaux Avances National Press, USA, 2006.
- [5] Laurent Gornet. Généralités sur les matériaux composites.
- [6] Jean-Marie Berthelot. Mécanique des matériaux et structures composites. Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, 176, 2010.
- [7] Asmane Seghilani and Said M’zyene. Etude de l’usinage des trous dans les coques de bateaux de pêche. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017.
- [8] Jean-Marie Berthelot. Mécanique des matériaux et structures composites. Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, 176, 2010.
- [9] C Bathias, A Bunsell, and E Morel. Matériaux composites 2^eme édition. Dunod, Paris, pages 1–6, 2009.
- [10] Christophe Binétruy. Structures sandwiches. Techniques de l’ingénieur. Plastiques et composites, (AM5141), 2008.
- [11] Nathalie Frigul and Annie Thébaud-Mony. Enseignement professionnel et santé au travail des jeunes. 2010.
- [12] François Berbain, Alain Chevalier, and Claude Choudin. Mise en oeuvre des composites : Méthodes et matériels. Techniques de l’ingénieur. Plastiques et composites, (A3720) :A3720–1, 1997.
- [13] Robert Piquet. Contribution a l’étude des reparations provisoires structurales aeronautiques ; etude du perçage de plaques minces carbone/ epoxy. PhD thesis, Toulouse 3, 1999.

- [14] P Guegan. Contribution a l'usinage des materiaux composites. 38.
- [15] H Ho-Cheng and CKH Dharan. Delamination during drilling in composite laminates. 1990.
- [16] CC Tsao and H Hocheng. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(10) :1085–1090, 2004.
- [17] W Konig and P Grass. Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets. *CIRP Annals*, 38(1) :119–124, 1989.
- [18] Laurent Surcin. Contribution ‘a l’étude théorique et expérimentale du perçage de plaques composites minces. PhD thesis, Toulouse 3, 2005.
- [19] Patrick Ghidossi. Contribution à l’étude de l’effet des conditions d’usinage d’éprouvettes en composites à matrice polymère sur leur réponse mécanique. PhD thesis, Paris, ENSAM, 2003.
- [20] Aksel KOPLEV. Cutting of cfrp with single edge tools. 1980.
- [21] Aksel Koplev, Aa Lystrup, and T Vorm. The cutting process, chips, and cutting forces in machining cfrp. composites, 14(4) :371–376, 1983.
- [22] DH Wang, Mamidala Ramulu, and D Arola. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. part i : unidirectional laminate. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(12) :1623–1638, 1995.
- [23] P Guegan, F Lemaitre, and J Hamann. Contribution a l'usinage des materiaux composites. In *La Construction Navale en Composites*, Paris (France), 7-9 Dec 1992, 1992.
- [24] John Le Dref. Contribution à la modélisation du perçage assisté par vibration et à l’étude de son impact sur la qualité d’alésage : application aux empilages multi-matériaux. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2014.
- [25] Driss Bendjaballah and B Necin. Analyse des plaques composites carbone/époxyde sous l’effet des efforts de perçage. 2009.
- [26] Nathalie Frigul and Annie Thébaud-Mony. *Ou mène le bac pro : Enseignement professionnel et santé au travail des jeunes*. 2010.
- [27] Daniel Iliescu. Approches experimentale et numerique de l’usinage a sec des composites carbone/epoxy.
- [28] Rabia Boubeker. Etude Expérimentale et Numérique du Comportement des Plaques Trouées en Matériaux Composites. PhD thesis, Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [29] Cédric Bonnet. Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l’empilage Ti6Al4V/Composite fibre de carbone. PhD thesis, Arts et Métiers Paris-Tech, 2010.

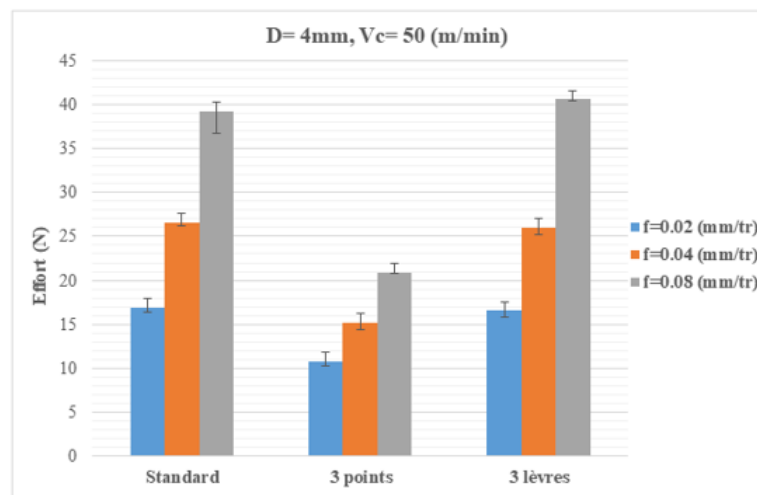
- [30] Daniel Ilescu. Approches expérimentale et numérique de l'usinage a sec des composites carbone/époxy. PhD thesis, Arts et Métiers Paris- Tech, 2008.

ANNEXES

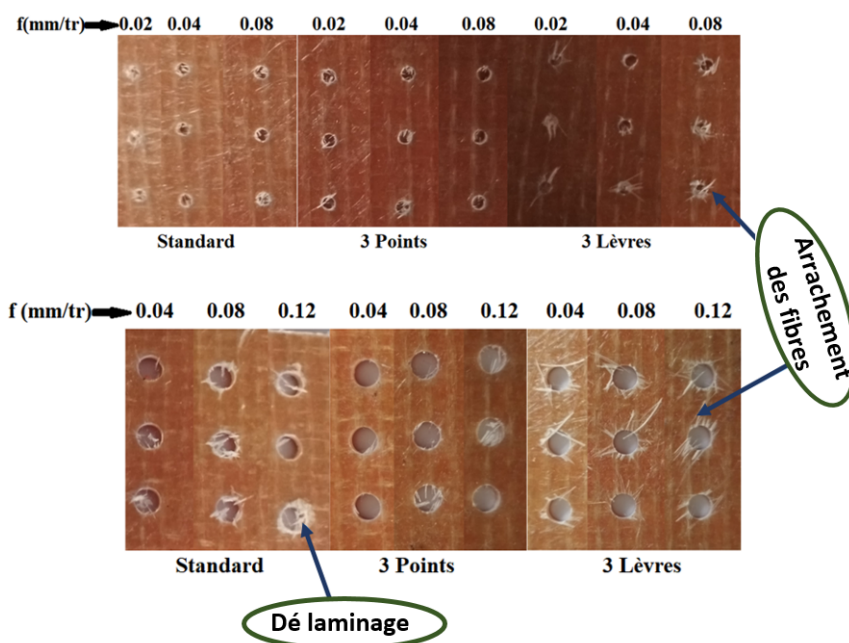
* Influence de type de l'outil et de la vitesse d'avance sur l'effort de coupe
 * Pour la vitesse de coupe = 35 (m/min)



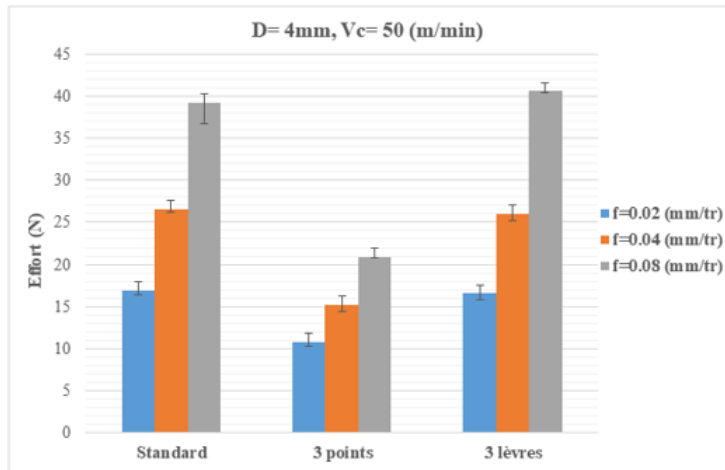
(a)



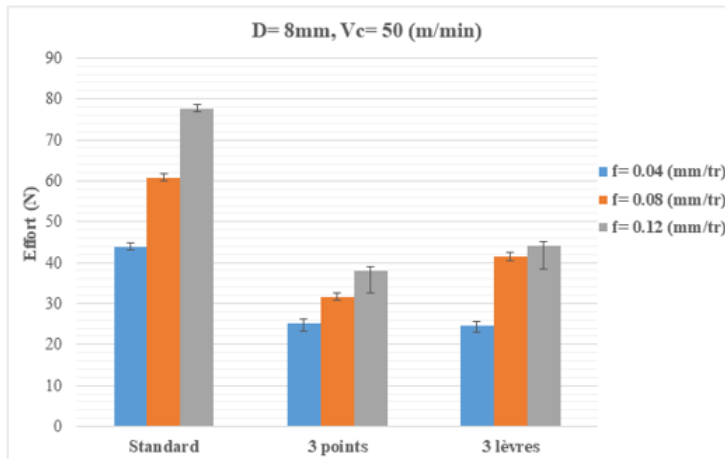
(b)



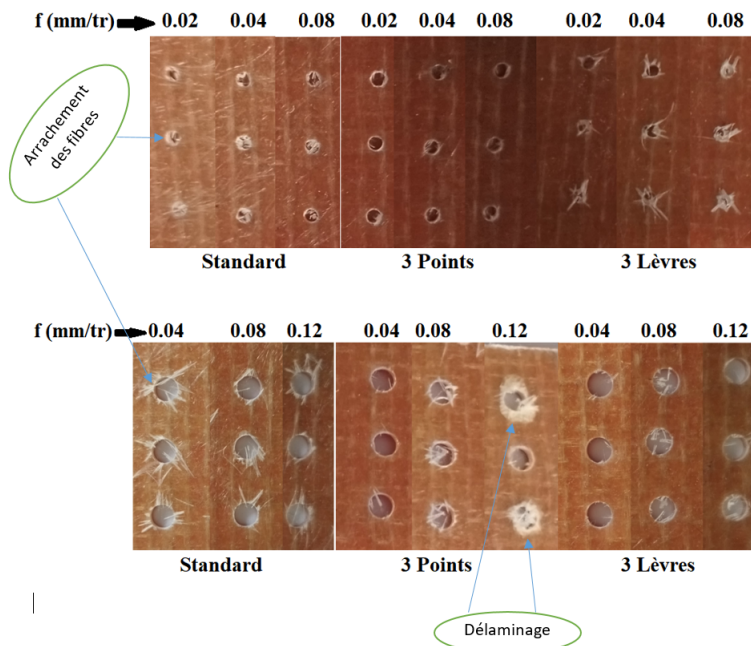
* Pour la vitesse de coupe = 50 (m/min)



(a)

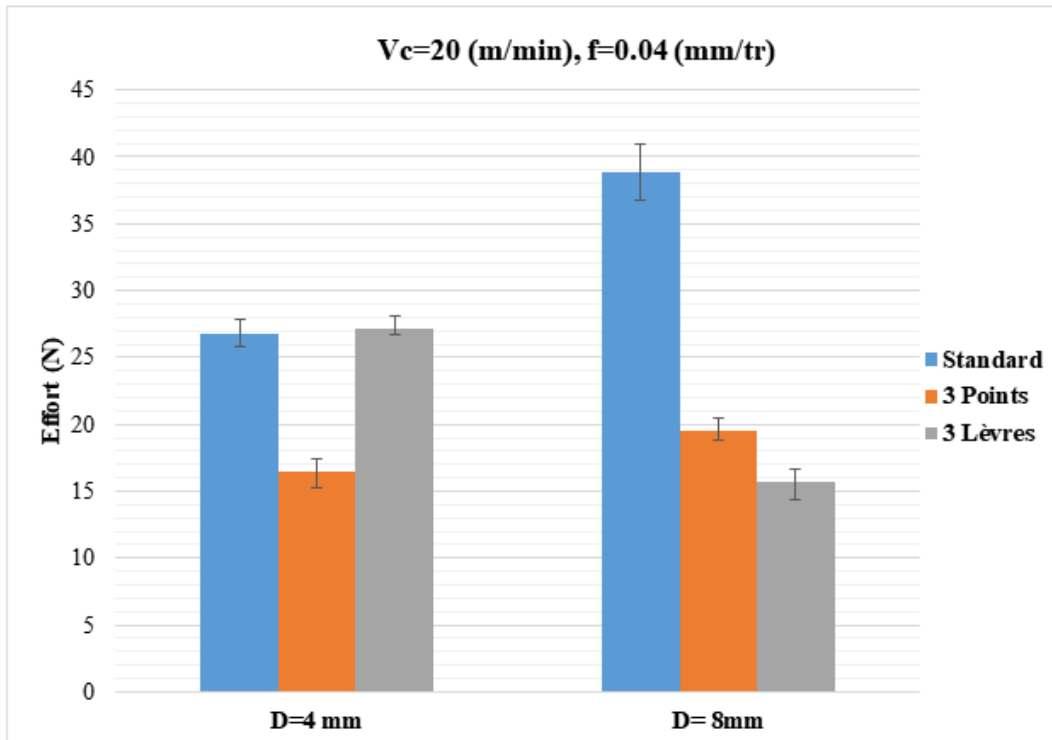


(b)

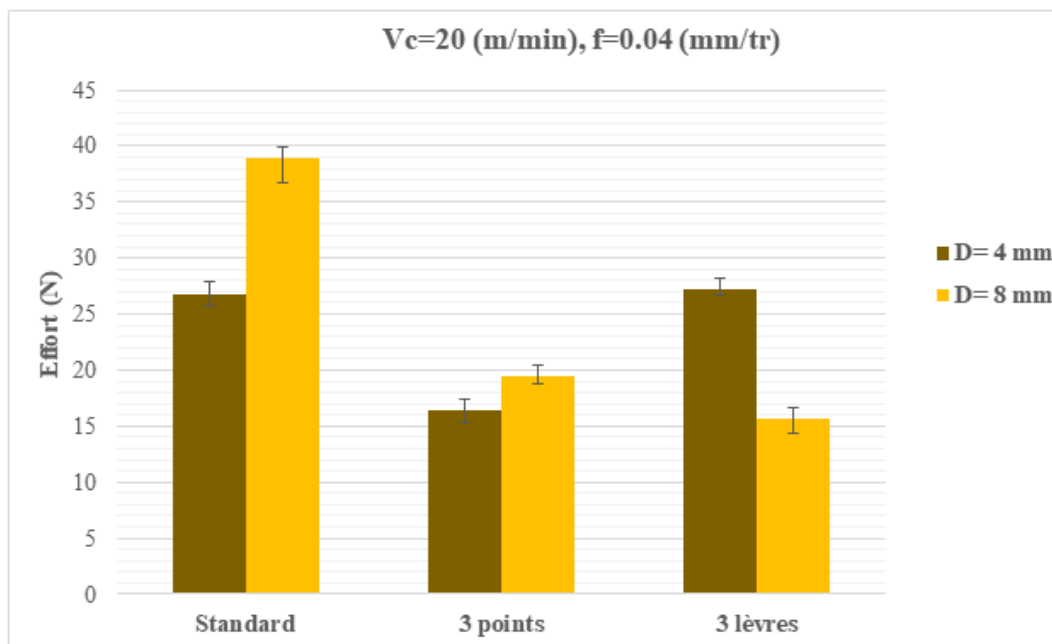


*Influence de diamètre et de type de l'outil sur l'effort de coupe

* Pour la vitesse de coupe = 20 (m/min) et la vitesse d'avance = 0.04 (mm/tr).

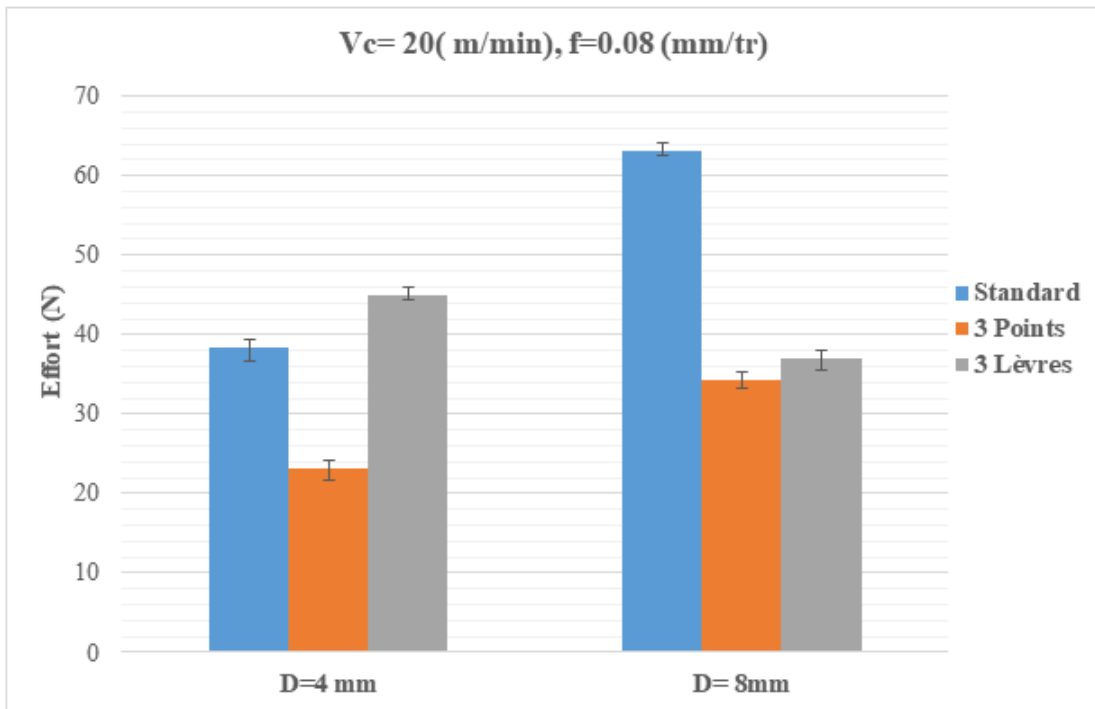


(a)

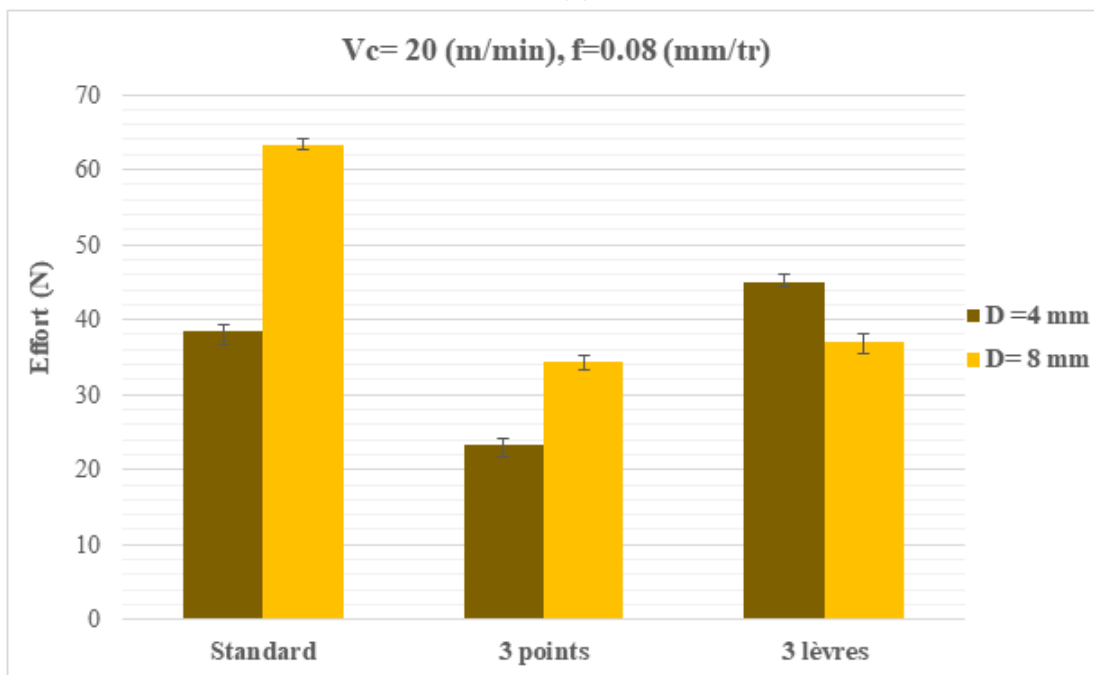


(b)

* Pour la vitesse de coupe = 20 (m/min) et la vitesse d'avance = 0.08 (mm/tr).

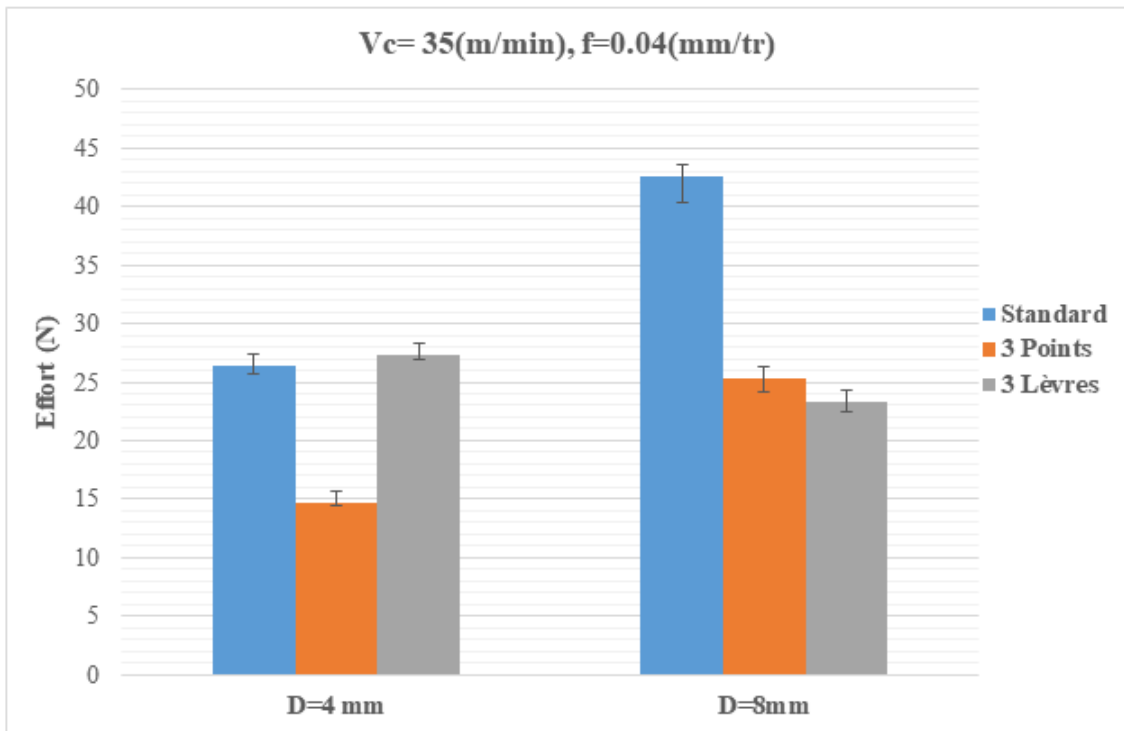


(a)

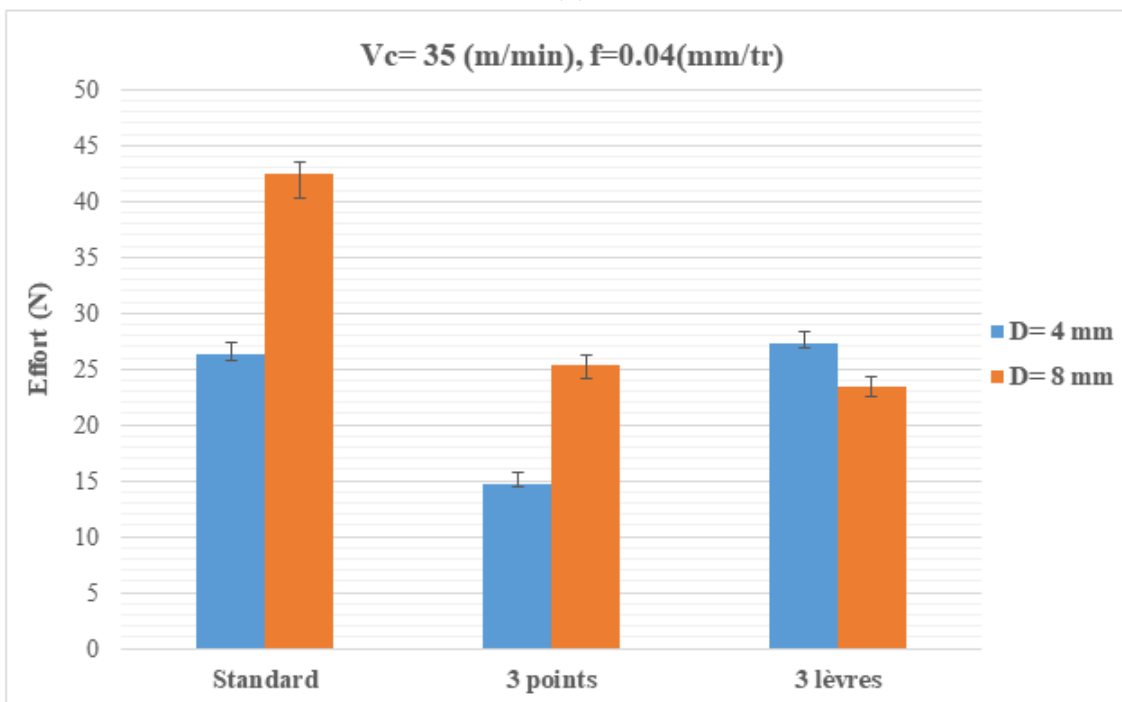


(b)

* Pour la vitesse de coupe = 35 (m/min) et la vitesse d'avance = 0.04 (mm/tr).

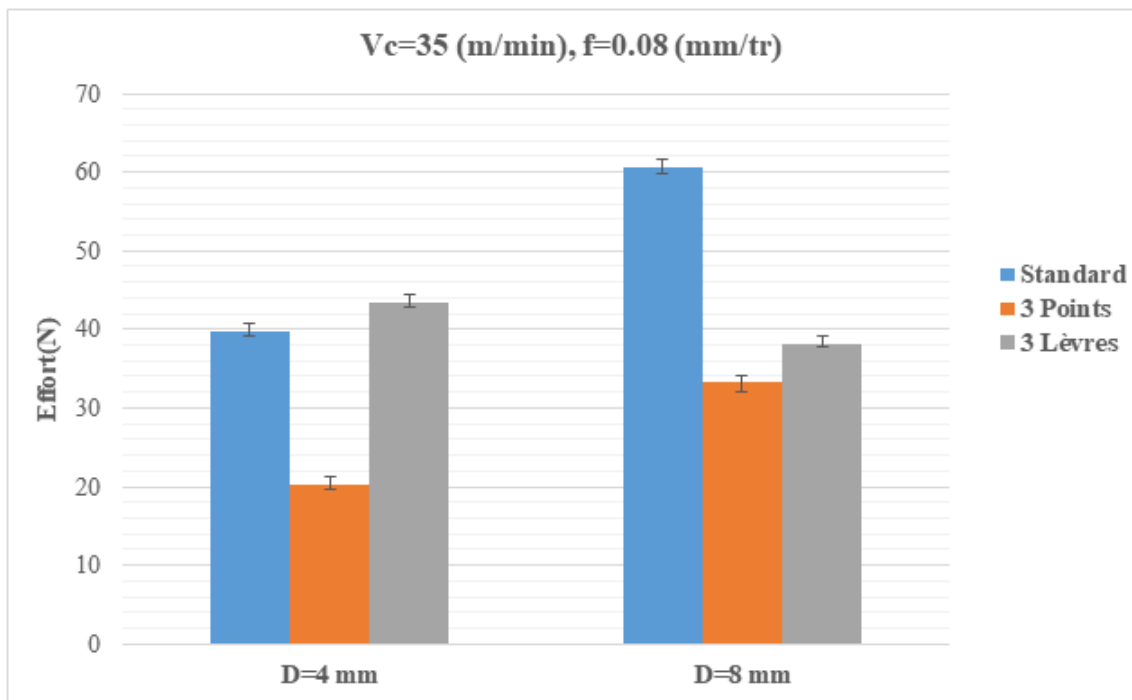


(a)

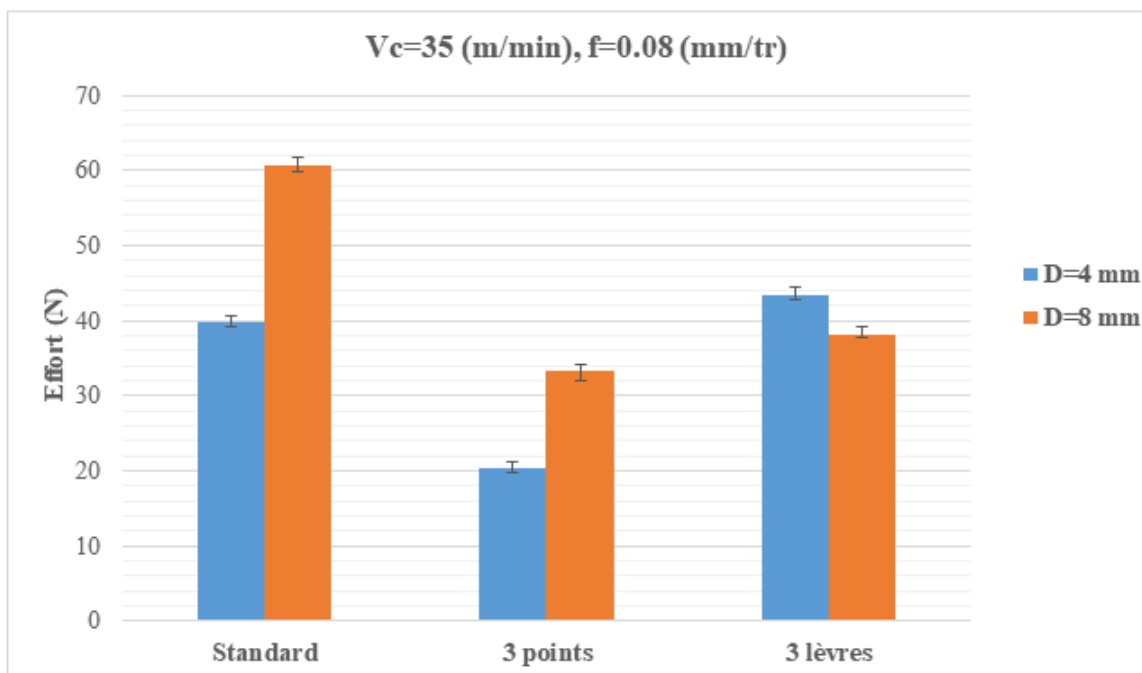


(b)

* Pour la vitesse de coupe = 35 (m/min) et la vitesse d'avance = 0.08 (mm/tr).

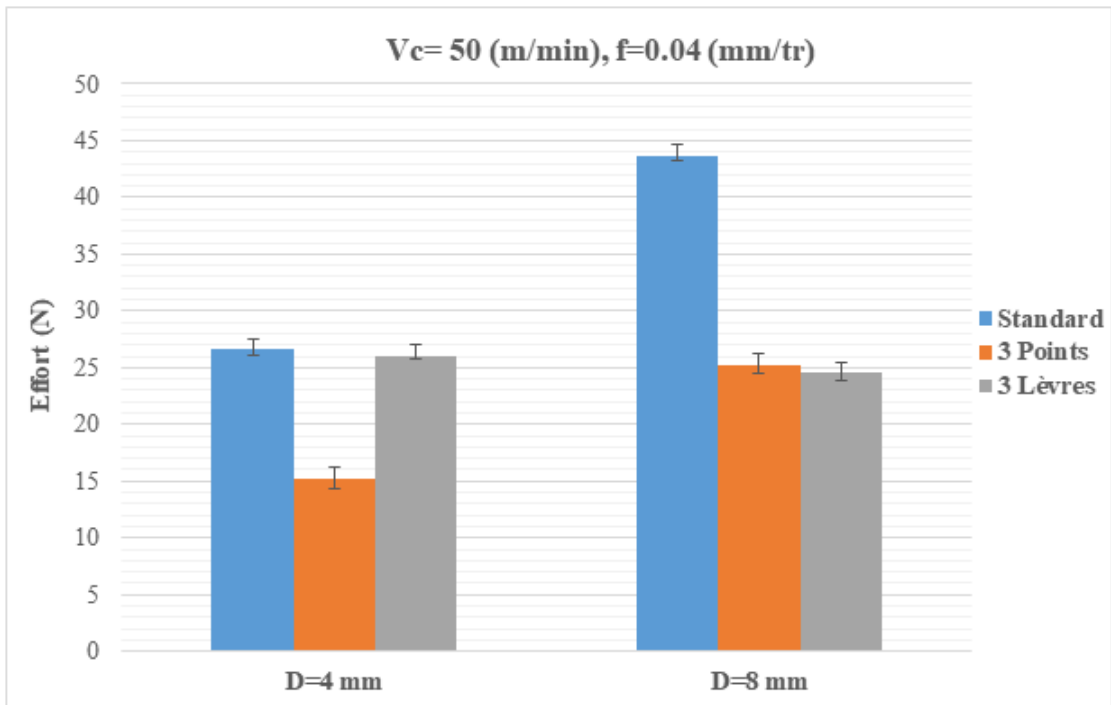


(a)

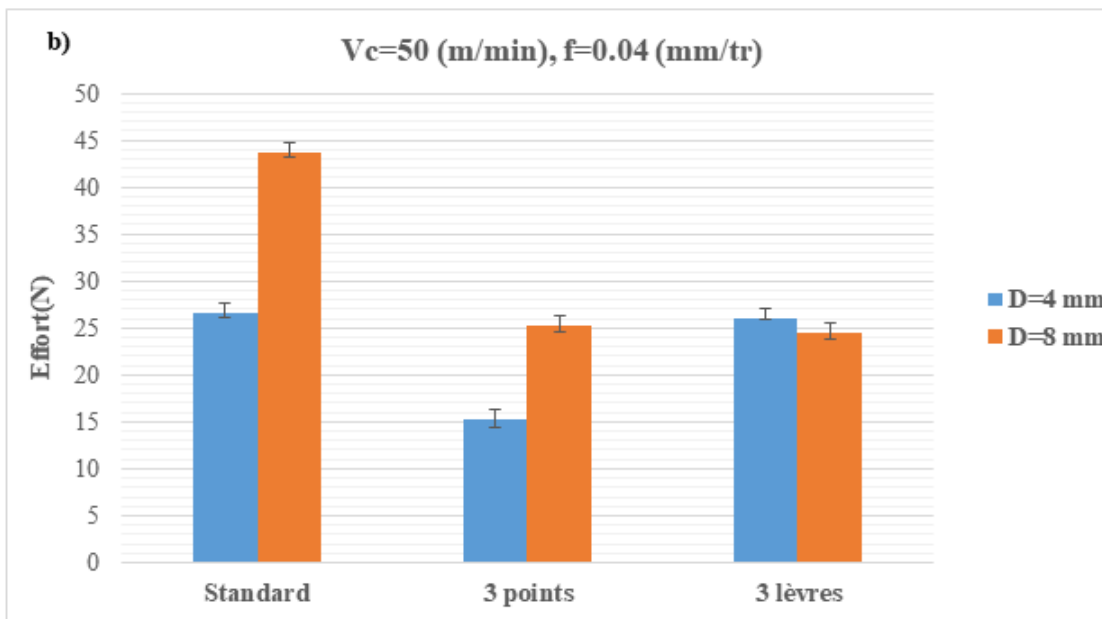


(b)

* Pour la vitesse de coupe= 50 (mm/min) et la vitesse d'avance= 0.04 (mm/tr).

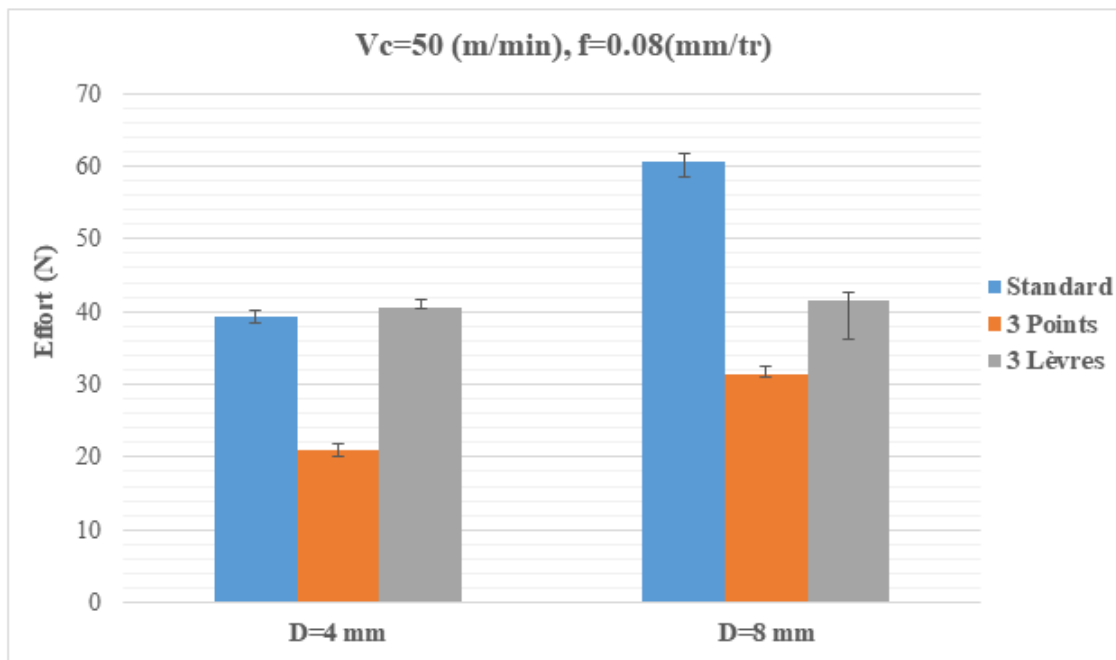


(a)

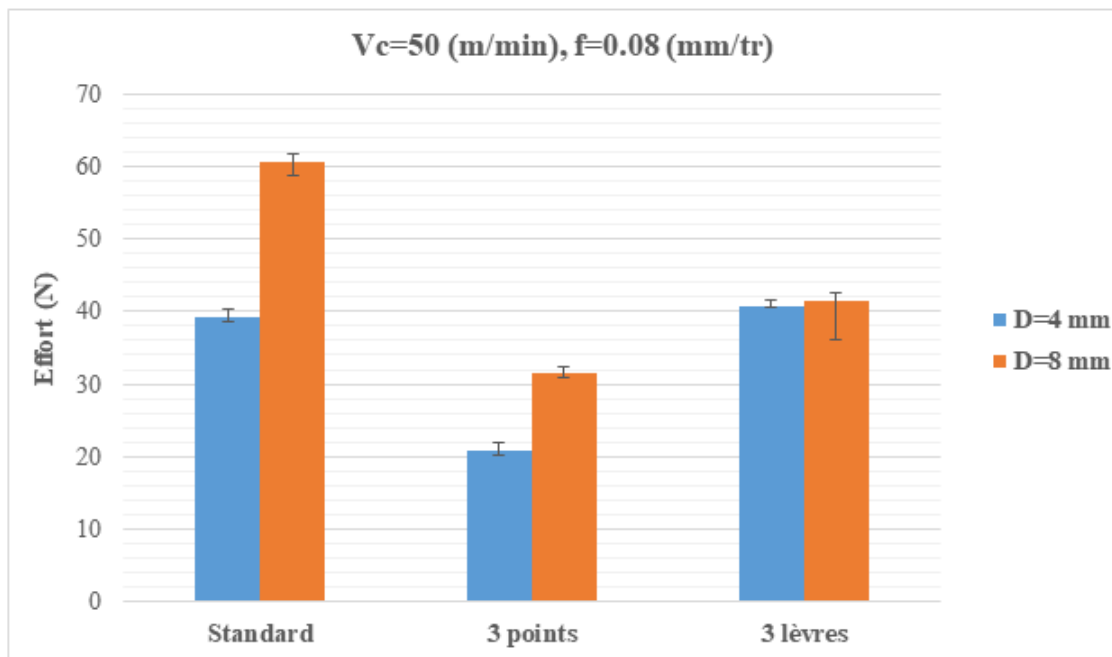


(b)

* Pour la vitesse de coupe= 50 (mm/min) et la vitesse d'avance= 0.08 (mm/tr).



(a)



(b)